

ОПЕРАТИВНЫЙ КОНТРОЛЬ ЖИДКИХ СРЕД

Г. М. Айрапетяни, Т. С. Хасаншин, А. П. Марков, В. В. Потапкин

Рассмотрены и проанализированы существующие средства контроля мутности (прозрачности) жидких сред. Сформулированы требования к разработке систем контроля состояния жидких сред на базе волоконно-оптического измерителя прозрачности. Предложены схемы портативных мутномеров, предназначенных для оптического контроля с набором световодных зондов.

Введение

Модернизацию и реконструкцию химико-технологических, пищевых и других производств проводят с целью повышения качества и увеличения выпуска продукции при уменьшении затрат на ее производство. Для решения этой задачи требуются переход на более совершенную технику и технологии, а также на современные системы управления процессами. Современные автоматизированные системы управления имеют в своем составе автоматический контроль качества сырья, компонентов, полупродуктов и продукции. Качество продукции определяется ее составом, физико-химическими свойствами, цветом, запахом, прозрачностью, кислотностью и др. В формализованном отображении состояний и свойств реального технологического процесса, его качественных показателей определяющее значение имеют информационно-физические преобразования (датчики), посредством которых измеряется и передается первичная информация.

Для эффективной системы технологический процесс – управление необходимо оперативное и своевременное информирование о появлении зарождающихся отклонений. Наличие такой обратной связи позволяет эффективно управлять ходом и параметрами технологического процесса.

Вода является важным компонентом пищевых продуктов. Во многих случаях водоподготовка оказывает существенное влияние на качество готовой продукции. Одним из показателей качества воды является параметр прозрачность. Этот параметр контролируется при производстве пива, вина, безалкогольных напитков, масла, а также в энергетике и очистке сточных вод.

Существующие средства контроля мутности (прозрачности) жидкостей имеют ряд недостатков, таких как запаздывание передачи информации, большой массогабаритной аппаратуры, узкий диапазон измерения, большие ошибки измерений и передачи показаний.

В представленной работе рассмотрены волоконно-оптические мутномеры со световодным каналированием, распределением и ориентацией элементарных световых потоков, обеспечивающих возможность комплексного учета информативных параметров неоднородностей среды и с высокой помехозащищенностью передачи информации в аналоговом или цифровых кодах. Это дает возможность ввода информации непосредственно в компьютеры и контроллеры без дополнительных преобразований.

Результаты исследований и их обсуждение

Анализ литературных источников, различных технологических схем показал, что для контроля состояния жидких сред используются различные методы оценки наличия и свойств неоднородных включений в технологически однородную среду. Основными методами определения прозрачности жидкой среды являются лабораторный, приборные методы и визуальный. На параметры и качество технологических процессов (ТП) пищевых производств оказывают влияние технологические среды, в условиях которой выполняется та или иная операция. При этом параметры такой среды определяются особенностями работы оборудования и текущим ходом всего ТП с его многообразными режимами и спецификой. Важным показателем ее качества является наличие некоторых неоднородностей химической или физической природы. Появление и наличие таких неоднородностей сказывается на ее качестве, которая

вызвана влиянием взвешенных веществ, твердых частиц ила, глины, водорослей и других микроорганизмов [1]. Допустимое содержание и количество этих неоднородностей определяется технологией и может колебаться в широких пределах. Разновидности жидких сред определяются назначением, например, вода питьевая и сточная, вода дистиллированная и систем охлаждения, вода в паровых котлах высокого давления – все эти виды воды отличаются разнообразием и допусками нормированных параметров.

В энергетических агрегатах вода должна быть практически полностью очищена от загрязнений. Различные примеси в питьевой воде обуславливают размножение вредных микроорганизмов, вызывая опасность для здоровья людей и снижая эффективность хлорирования. Наряду с ухудшением эстетического вида наличие неоднородностей приводит к изменениям биологических процессов и искажению результатов химического и биологического тестирования [2].

Прямые измерения концентрации, формы и размеров неоднородностей в виде сухого остатка, приходящегося на определенный объем жидкости, трудоемки и применяются в условиях лабораторных условий, при научных исследованиях и разработках новых методов и средств. По оценке неоднородных сред лабораторными методами устанавливаются фиксированные обобщенные параметры, в которых интегрально проявляются некоторые особенности различных спектрально-энергетических воздействий. Технологические исследования проб позволяют получать текущие данные в определенные интервалы времени, определяемые нормативными требованиями. Но в процессе мониторинга и оперативного контроля необходима первичная информация о текущем состоянии и дифференцированных свойствах среды на различных стадиях производства.

Издавна качество воды оценивалось человеком «на глазок», по запаху и по вкусу. Визуальные методы при сравнительной простоте характеризуются низкой чувствительностью, особенно в диапазоне низких значений мутности, где преобладают очень мелкие неоднородности. Используемые для подсветки источники отличаются длинноволновым спектром излучений, где эффективность рассеяния светового потока на мелких неоднородностях достаточно низкая.

Как более универсальная оценка прозрачность воды определяется взвешенными в ней неоднородностями, нарушающими прохождение светового потока, т.е. оптическим методом. Если в однородной воде световой поток практически не изменяется, то в замутненной – на взвешенных неоднородностях он рассеивается. При этом каждая неоднородность отражает и поглощает энергию света и в свою очередь сама становится точечным излучателем и источником первичной информации. То есть первичная информация неоднородной среды, формируемая разносторонне рассеянным светом, генерируется именно в момент замутнения. На характер разброса рассеянного света существенно влияет природа неоднородностей, их размеры, цвет, форма и интенсивность. Практически неоднородная среда как сито просеивает свет и косвенно отражает состояние воды как неоднородной среды. Пространственно-временное распределение рассеянной энергии определяется соотношением размера неоднородностей и длины волны излучения. При длине волны излучения значительно превышающей размер неоднородности поток излучения рассеивается симметрично и его интенсивность рассеяния в прямом и обратном направлениях практически одинакова. С ростом размеров неоднородностей точечные излучатели создают элементарные световые потоки, которые интерферируют и складываются в направлении проходящего светового потока. От этого изменяется характер распределения интенсивностей света по всем направлениям. При этом мелкие неоднородности хорошо рассеивают коротковолновое излучение, не оказывая влияние на длинноволновую составляющую. Но крупноразмерные неоднородности лучше рассеивают длинноволновую составляющую воздействующего излучения, что создает предпосылки для дифференцированной оценки неоднородной среды [4, 5].

Характер распределения рассеянного излучения зависит от формы и коэффициента преломления неоднородностей. Анализ показывает, что эффект рассеивания усиливается, когда

сильнее различаются коэффициенты преломления воды и неоднородностей и спектральный диапазон излучений. Окрашенные неоднородности склонны поглощать составляющую определенной области спектра, изменяя тем самым свойства как проходящего, так и отраженного излучения.

С изменением размеров и концентрации неоднородностей изменяется и характер взаимодействия света. С ростом концентрации растет интенсивность рассеяния, из-за чего происходит множественное взаимодействие с неоднократным рассеянием и поглощением излучения. При некотором соотношении параметров неоднородностей и излучения устанавливаются определенные граничные уровни проходящего и рассеянного излучения, определяющие физические возможности измерения мутности среды.

Наряду с субъективными факторами влияние на достоверность контроля мутности оказывает случайно изменяющееся поглощение, которое может значительно превышать рассеяние, особенно для цветных неоднородностей. При низкой степени рассеяния изменения элементарного светового потока в узком сечении с точечным светоприемником настолько малы, что находятся в зоне его нечувствительности. Здесь же сказываются и собственные шумы элементов цепи преобразований. Автоматизация на основе таких методов имеет определенные сложности в первичных преобразованиях.

Низкая чувствительность и соответственно слабая проявляемость неоднородностей ставят задачу более эффективного учета характера пространственно-временного распределения элементарных световых потоков в зоне их взаимодействия с неоднородной средой. Суммарный эффект взаимодействия воздействующего источника излучений с неоднородной средой проявляется в некотором информативном излучении, наиболее полно отражающем реальное состояние в количественной и качественной мере.

Долевое распределение составляющих элементарных световых потоков зависит от соотношения спектральных характеристик излучателя, рассеяния, размеров, формы, материала и концентрации неоднородности в элементарном объеме среды.

Для разработки оптической системы волоконно-оптического мутномера было принято, что информативное излучение Φ_u , формируемое при взаимодействии излучения Φ_0 длиной волны λ , рассеянное под углом β к первоначальному направлению распространения частицами, сечение которых значительно меньше λ , с достаточным для инженерных расчетов приближением определяется по закону Релея [2, 5]:

$$\Phi_u = \Phi_0 \left(\frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2 + n_2^2} \right)^2 \cdot \frac{N \cdot V^2}{\lambda^4 \cdot r^2} \cdot (1 + \cos^2 \beta), \quad (1)$$

где n_1 и n_2 – соответственно коэффициенты преломления неоднородной и однородной фаз среды;

N – количество неоднородностей в единичном объеме;

V – объем отдельной неоднородности;

r – расстояние до светоприемника;

β – угол между падающим и рассеянным излучениями.

Информативное излучение для среды с неоднородностями соизмеримыми с длиной волны рассеянного излучения определяется некоторым коэффициентом рассеяния σ излучения неоднородностями радиуса r и описывается выражением

$$\sigma_{(\lambda,r)} = k \cdot \pi \cdot r^2, \quad (2)$$

где k – коэффициент, комплексно учитывающий соотношение радиуса неоднородностей, длины волны излучения и диэлектрической проницаемости материала неоднородностей.

В этом случае информативное излучение можно представить выражением

$$\Phi_u = \Phi_0 [1 - \exp(-3 \cdot C \cdot l \cdot \sigma / 4r)], \quad (3)$$

где C – объемная концентрация неоднородностей;
 l – длина пути светового потока в среде.

Более общим случаем является среда с разнообразными неоднородностями, а информативное излучение моделируется зависимостью

$$\Phi_u = \Phi_0 \left[1 - \exp \left(- \frac{3}{4} \cdot \sum_{i=1}^m \frac{C_i}{r_i} \cdot l \cdot \sigma_{(\lambda, r_i)} \right) \right], \quad (4)$$

где m – индекс различных типов неоднородностей;
 C_i – объемная концентрация неоднородностей i -го типоразмера;
 r_i – радиус неоднородностей i -го типоразмера;
 $\sigma_{(\lambda, r)}$ – коэффициент рассеяния излучения λ неоднородностями радиуса r .

Для неоднородных сред с параметрами $r_i \gg \lambda_i$ рассеяние в направлении проходящего светового потока становится преобладающим над рассеянием по другим направлениям. Но рассеяние в прямом направлении неоднородностями крупных размеров на 2–3 порядка превышает интенсивность излучения, рассеиваемого в боковом направлении.

На основании проведенного расчета нами были сформулированы требования к разработке системы контроля состояния жидких сред на базе волоконно-оптического измерителя прозрачности.

Модели физико-оптических преобразований на уровне первичной информации создают определенные преимущества автоматизированным методам оперативного контроля с учетом специфических особенностей неоднородных сред. Методические отличия физико-оптических взаимодействий выражаются в соответствующих различиях принципов формирования информативного излучения и их структурных реализациях. В погружных и проточных мутномерах более эффективна автоматизированная обработка информативного излучения и дистанционная передача для отображения и хранения результатов. Однако практически информационно-физическую границу применимости ручных и автоматизированных методов оперативного контроля неоднородных сред установить достаточно сложно. Многофакторная взаимосвязь параметров среды и воздействующего излучения носит случайный характер, что значительно усложняет схемотехнику и метрологию оптического контроля. Значительные сложности представляет и учет пространственно-временного распределения элементарных световых потоков сложного по своему спектральному составу излучения. В действительности же имеет место, что каждая спектральная компонента излучения по-своему взаимодействует с отдельными компонентами неоднородной среды и требует особого учета в автоматизированной обработке.

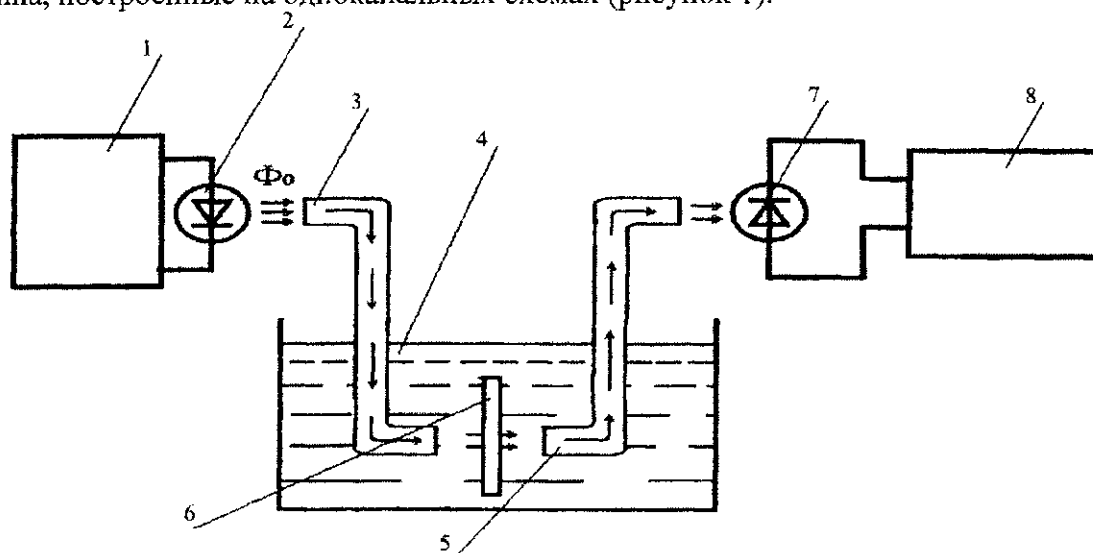
Структурно-алгоритмическая реализация информационно-преобразовательных процессов автоматизированной мутнометрии наряду с многокомпонентными особенностями неоднородной среды и излучений должна учитывать распределения элементарных световых потоков и условия эксплуатации. Случайно ориентированные потоки должны максимально учитываться в структуре информационно-преобразовательных каналов и характере воздействия побочных излучателей. В комплексных структурах мутнометрии преобладающими являются многоканальность, виды модуляции, режим работы, способы защиты и коррекции, спектрально-энергетическая стабильность и другие.

Сложности создания унифицированных мутномеров на комплексном использовании физико-технических преимуществ нефелометрии и турбидиметрии обуславливают разработку узкоспециализированных средств и технологий применительно к конкретным условиям и задачам оперативного контроля отдельных неоднородных сред для производств, предприятий и отраслей.

Современные средства автоматизации, элементная база и технологии оптоэлектроники, микропроцессорной техники, волоконной оптики, лазерной техники и других смежных областей позволяют эффективно строить информационно-преобразовательные процессы с автоматизацией отдельных операций уже на первичном уровне [6].

Нами предложены и реализованы схемы и конструкции волоконно-оптических мутномеров со световодным каналированием, распределением и ориентацией элементарных световых потоков, обеспечивающих возможность комплексно учитывать информативные параметры неоднородной среды и стимулирующего излучения с высокой помехозащищенностью и ориентированной передачей информативного излучения. Пространственно-изолированное распределение элементарных световых потоков по множеству оптических моноволокон, как светопроводящей среде, создает предпосылки для разнообразия схемных комбинаций, что особенно важно в оперативном контроле.

В схемном и конструктивном исполнении более простыми являются мутномеры погружного типа, построенные на одноканальных схемах (рисунок 1).



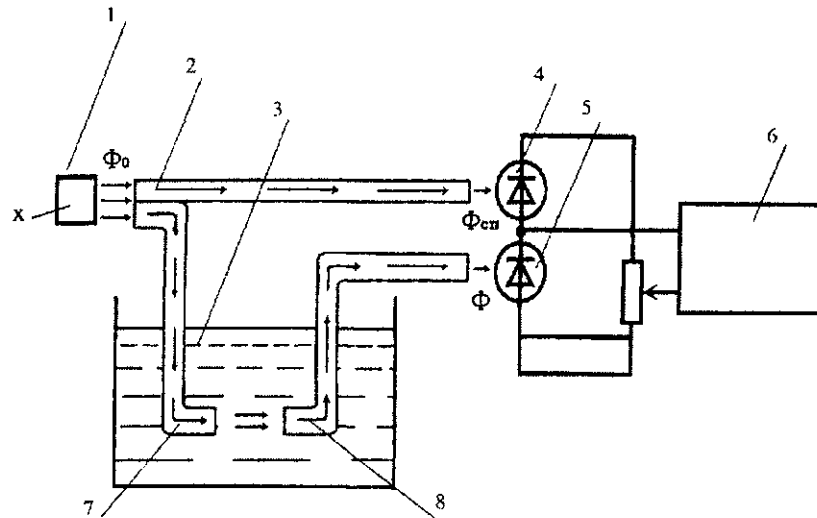
1 – генератор тока, 2 – светодиод, 3 – световод излучающий, 4 – среда, 5 – световод приемный, 6 – пластина эталонная, 7 – фотоприемник, 8 – усилитель

Рисунок 1 – Схема погружного мутномера одноканальная с эталонной пластиной

Световой поток Φ_0 светодиода-излучателя, питаемого стабильным генератором тока, вводится в излучающий световод для непосредственного ввода в исследуемую среду. Такое направленное воздействие лучистого потока в требуемом элементарном объеме среды позволяет эффективно использовать информационно-преобразовательные возможности оптико-волоконной и микропроцессорной техники. Световодное каналирование лучистого потока обеспечивает помехозащищенное дистанцирование информативных излучений и механическую защиту оптико-электронного канала от излучателя и до оптико-электронного блока. Встраиваемая эталонная пластина эффективна при тарировке мутномеров, в отличие от такой трудоемкой процедуры с набором градуационных образцов. Для таких приборов присущи все ограничения одноканальных способов контроля.

В мобильных мутномерах используются многоканальные схемы с многодиапазонными измерениями концентрации неоднородностей. За счет оптических прямых и обратных связей информативное излучение и излучение разнородных взаимодействий как помех создаются более совершенные методы и высокостабильные средства оптического контроля непосредственно в процессах водозабора, очистки, транспортировки и т. д. Пространственное разделение и выделение элементарных световых потоков позволяет спектрально разделять компоненты информативного излучения и строить легко перестраиваемые структуры мутномеров с локальным зондированием в широком диапазоне.

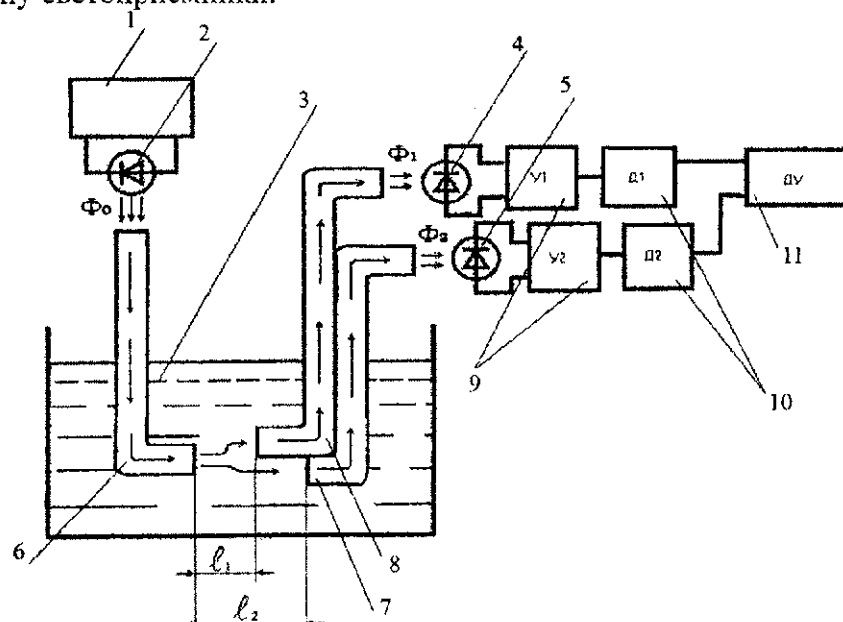
Двухканальная схема погружного мутномера строится на световодном каналировании отдельного светового потока источника по каналу излучающего световода и опорному с дополнительно предусмотренным световодом (рисунок 2). Такая схемная избыточность обеспечивает лучшую стабильность и чувствительность при некотором усложнении конструкции прибора.



1 – источник излучения, 2 – световод опорного канала, 3 – среда, 4 – фотоприемник опорного канала, 5 – световод измерительного канала, 6 – дифференциальный усилитель, 7 – излучающий световод, 8 – приемный световод

Рисунок 2 – Схема погружного мутномера двухканальная с изолированным опорным каналом

В световодной мутнометрии эффективно реализуется комбинированный контроль прозрачности и концентрации неоднородностей на физических основах нефелометрии и турбидиметрии. Канальность опτικο-волоконных схем функционально представляет, с одной стороны, каналированный многоэлементный излучатель, а с другой – пространственно разделенный многоэлементный светоприемник. В соответствии с принятым алгоритмом такие световодные жгуты встраиваются в единую параметрическую цепь информационно-оптических преобразований. При этом, комбинируя расположение оптических волокон в осветительном и информационном световодах, можно расщеплять излучение источника и строить спектрально-энергетические источники и селективно ориентированные по спектральному диапазону светоприемники.



1 – генератор тока, 2 – светодиод, 3 – среда, 4 – фотодиод опорного канала, 5 – фотодиод измерительного канала, 6 – излучающий световод, 7 – приемный световод опорного канала, 8 – приемный световод измерительного канала, 9 – усилители опорного и измерительного каналов, 10 – детекторы опорного и измерительного каналов, 11 – дифференциальный усилитель, l_1 – , l_2 – длины пути светового потока в среде.

Рисунок 3 – Схема погружного мутномера двухканальная с совмещенным опорным каналом

Такая особенность оптических преобразований первичной информации позволяет эффек-

тивно применять метод спектрально-энергетического сравнения и селекции в комбинированном оперативном контроле.

В световодных схемах компенсационных преобразований эффективно использование различного рода эталонных регулируемых ослабителей. За счет световодного коллектора-распределителя излучение источника одновременно взаимодействует как с ослабителем, так и с неоднородной средой. При некотором усложнении конструкции мутномеров улучшаются их метрологические характеристики, особенно в оперативном контроле неоднородных сред в реальном времени.

В условиях оперативного контроля мобильными мутномерами с введением компенсационного канала эффективно нейтрализуется влияние разнородных засветок (рисунок 3).

При этом излучение источника по излучающему световоду ориентированно воздействует на среду, а по опорному и измерительному световодам сформированное информативное излучение передается на светоприемники с последующей микропроцессорной обработкой в соответствии с принятым алгоритмом.

На основе экспериментальных испытаний и метрологической аттестации, разработаны опытно-промышленные образцы портативных мутномеров с набором световодных зондов для оптического контроля и исследования характера распределения неоднородностей [3,7].

Класс точности этих систем не превышает 1.

Заключение

В результате проведенных исследований показано, что оптико-электронные преобразователи информации, основанные на волоконной оптике, обеспечивают более высокую разрешаемую способность и реализуют систему считывания, чем упрощается обработка первичной информации, повышается точность измерения и надежность функционирования технических средств при автоматизации оперативного контроля жидких сред. Многоканальное разделение и направление информативных лучистых потоков обеспечивает эффективную структурно-алгоритмическую реализацию операционных преобразований и дистанцирование первичной информации. Разработанные опытно-промышленные образцы портативных и мобильных оптико-электронных мутномеров отличаются высоким уровнем точности, мобильностью и эффективностью оперативного контроля при небольших массогабаритных параметрах и простоте обслуживания. Эти системы могут быть успешно применены в автоматизированной системе управления технологическими процессами.

Литература

1. Белый, О.А. Загрязнения окружающей среды и оценка экологической безопасности Беларуси / О.А.Белый // *Литье и металлургия* №4 (32), 2004. – С. 121–123.
2. Мирошников, М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов: учеб. пособие для приборостроительных вузов / М.М.Мирошников. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение.1983. – 696с.
3. Оптический способ контроля прозрачных изделий: а.с. 1111026 СССР, МКИЗ G01B 11/08 / Г.М. Айрапетьянц, В.Ф. Гоголинский, В.Ф. Усик; Могилев: Машиностроительный ин-т № 3601815; заяв.08.06.83; опубл.30.08.84 // *Открытия. Изобрет.* 1984. – № 32. – С–4.
4. Копылов, А.С. Водоподготовка в энергетике / А.С. Копылов, В.М. Лавыгин, В.Ф. Очков. – М.: изд-во МЭИ, 2003.
5. Потапов, А.И. Некоторые направления совершенствования волоконно-оптической техники контроля и дефектоскопии / А.И. Потапов, С.С. Сергеев, А.П. Марков и др. // *Неразрушающий контроль и диагностика окружающей среды, материалов и промышленных изделий: межвузовский сб.* Вып. 12. – СПб.: СЗТУ, 2006. – С. 3–8.
6. 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: межвузовский сб.* вып. 10. – СПб.: СЗТУ, 2004. – С. 26–31.
7. Марков, А.П. Анализ оптико-электронных приборов технологического контроля жидких сред / А.П.Марков // *Вестник МГТУ*, 2006. №2 (11) – С. 120–127.

Поступила в редакцию 17.04.2009