



The ways and means of fibre-optic and optic-electronic thermoscopy in casting and metallurgy are examined.

*А. П. МАРКОВ, ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет»,
Е. И. МАНУКОВИЧ, Е. М. ПАТУК, ИТМ НАН Беларуси,
А. Г. СТАРОВОЙТОВ, РУП «МОГИЛЕВЭНЕРГО»*

УДК 681.518.3:681.586.36

СПОСОБЫ И СРЕДСТВА ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕРМОСКОПИИ

Тепловое поле как пространственно-временное распределение температуры в технологической среде является важнейшей характеристикой теплофизических процессов в литье и металлургии. С помощью различных физических эффектов и устройств теплоэнергетические свойства среды проявляются в определенных информативных параметрах [1].

Термоскопия параметров теплофизических процессов предполагает визуализацию пространственно-временной структуры поверхностного теплового поля обследуемого объекта. Нормальному состоянию объекта соответствуют нормируемые параметры однородного поля. В аномальных отклонениях теплофизического отображения проявляются информационно-физические особенности формирующихся неоднородностей. Трещины в структуре, поры, раковины, непровары, отклонения геометрических размеров и форм, как и поверхностные отклонения, накладывают свои «отпечатки» в равномерной пространственно-временной структуре теплового поля. Подповерхностные участки с нарушениями тепло- и электроизоляции, с неоднородным составом и другими отклонениями от допустимых, в информационно-технических характеристиках также находят отражения как потенциальные дефекты. Скопируя тепловое поле, отображают его количественные и качественные характеристики, присущие отдельной операции, их совокупности и всему технологическому процессу [2,3].

Высокие информационно-метрологические и технико-эксплуатационные возможности и современная элементная база создают перспективу развития и совершенствование традиционных и хорошо освоенных способов и средств термоскопии в направлении дистанционного скопирова-

ния с оптико-электронной и процессорной обработкой первичной информации.

Потребность в рационализации термоскопии возникает как при разработке новых изделий, технологий и производств, так и при реконструкции и модернизации уже существующих во многих отраслях промышленности – в литье, металлургии, химической, стекольной и др. Термоскопия необходима в одних случаях для контроля теплового состояния при перемещении материала, например, при непрерывном литье, прокатке листов, профиля или труб, или измерения температуры слитков, слябов, расплава металла или стекломассы, в других – скопирование объемов закрытых камер. Это имеет место при измерении температуры в вакуумных камерах, печах закалки или обжига в активной или защитной среде, когда копируется пространственно-временное распределение параметров теплового поля.

При всем многообразии физических возможностей способов и средств термометрии практическое применение находят лишь те, которые усовершенствуются на основе современной элементной базы преобразовательной и информационной техники и технологий. Такая модернизация и реконструкция выполняется с учетом технологических требований совершенствующихся и развивающихся производств и специфики отраслей.

Принципиальные различия в способах и средствах термоскопии заключаются в методах возбуждения и формирования теплового поля. Если в активном методе предполагается предварительный нагрев по поверхности или объему объекта, то в пассивном первичная информация формируется по генерируемому и воспринимаемому собственному излучению контролируемой зоны (участка). Соответственно и применимость спосо-

бов скопирования определяется в случаях превышения излучения над окружающим фоном в пассивном методе, например, при контроле литья, нагретых слитков металла и фиксирования экстремальной температуры в зонах направленного теплового воздействия в активном методе [4–6].

Тепловые поля по уровням термоскопирования условно разделяются на низко- (0–150 °С), средне- (150–800 °С) и высокотемпературные (800–3000 °С и выше). Соответственно выбираются и способы термоскопирования и сканирующие устройства. Для низкотемпературных полей преимущественно применяются оптико-механические сканирующие охлаждаемые термоприемники, для среднетемпературных – оптико-механические с неохлаждаемыми термоприемниками, а для высокотемпературных полей – оптико-электронные и телевизионные сканирующие системы. Для всех этих способов особой проблемой является формирование и локализация термоконтраста, помехозащищенное преобразование и дистанцирование первичной информации в места потребления.

Особо значимы эти операции в способах и средствах скопирования тепловых полей, уровень температуры которых близок с температурой окружающей среды (влияние побочных потоков излучений). В таких способах относительная погрешность термоскопирования сравнима с погрешностью в определении коэффициента излучения (излучательной способности поверхности), что особенно важно в абсолютных и относительных измерениях по методам непосредственной оценки или сравнения. Рациональный выбор методов термоскопирования в большей мере проявляется при высокочувствительном скопировании точечных участков и зон в зависимости от специфических свойств среды. Современные задачи термоскопирования требуют и соответствующих способов и средств визуализации и обработки температурных полей [7].

Ввиду возросших требований к технике и технологиям термоскопирования и термометрии расширяется потребность в быстром и бесконтактном контроле тепловых полей. В решении таких задач весьма перспективно использование способов и средств с оптико-электронным скопированием и функциональным преобразованием изображений отклонений температурных полей, формируемых и локализуемых телескопическими методами с синтезированием и распределением тепловых изображений. В одних случаях с ограниченным доступом к источникам информации функциональное преобразование производится над частью

элементов изображения, воспринятых анализирующим блоком. К таким преобразованиям относятся формирование контурных, изофотометрических, и изотермических линий, выделение зон заданного параметра и т. д. В других случаях по существу формируется новое изображение, синтезируемое из нескольких первичных изображений. В таких способах используются одновременно несколько работающих анализаторов и синтезаторов изображения.

И в том и в другом случае из всего комплекса первичных сообщений о состоянии участков выделяются информативные параметры поля с температурой, соответствующей заданному уровню. Путем непосредственного сравнения излучений сканируемых участков поля с излучениями калибровочного источника (эталонного уровня) устанавливаются наличие и характер технологических отклонений. Такие подходы к информационно-преобразовательным процессам более эффективно реализуются в способах селективного скопирования с оптико-электронной обработкой [8].

В бесконтактных способах и средствах термоскопии общим для всех методов скопирования тепловых полей является единый носитель первичной информации, каким является электромагнитное излучение. При этом источником первичной информации служит температурный рельеф, представляющий фактическое тепловое изображение отклонений (изменений) теплового поля. На тепловом изображении проявляются его аномальные отклонения как в объеме, по поверхности, так и в структуре нагреваемого объекта. С ростом температуры материального объекта энергия движения его частиц возрастает и в некотором состоянии появляется тепловое излучение в видимом, ИК и ультрафиолетовом диапазонах длин волн. На плотность излучения влияет не только температура, но и свойства поверхности, характеризующиеся излучательной способностью (коэффициентом излучения) [3, 4].

Способы оптической пирометрии реализуются на методах непосредственной оценки путем селективного выделения информативной части излучения в направлении хода лучей либо путем сравнения с контрольным излучением. В первом случае текущее значение измеряемой температуры оценивается по энергии, воспринимаемой непосредственно фотоприемником. Выходной электрический сигнал отображается на измерительном приборе и градуируется в единицах температуры. Во втором случае осуществляется субъективная оценка наблюдателем, который оценивает в ограниченном интервале длин волн видимой области спек-

тра яркость скопируемой поверхности и яркость регулируемого излучателя. При этом сравнение яркостей осуществляется двумя способами: варьированием (известным) мощности излучателя или яркости воспринимаемого излучения перемещением серого оптического клина при стабилизированной яркости сравнительного излучателя. Путем уравнивания яркостей фиксируется либо мощность нагрева нити, либо величина смещения серого оптического клина [4].

Однако воспринятая или яркостная температура теплового поля будет истинной, если спектральный коэффициент излучения скопируемой поверхности будет равен единице. Некоторая зависимость результатов от удаления наблюдателя, т. е. от расстояния визирования и схем регулировки мощности нагрева контрольного (образцового) излучателя, ограничивает нижний диапазон термоскопирования и точность измерений (погрешность $\pm 1\%$ верхнего значения температурного диапазона). За счет различных компенсационных схем улучшают метрологию пирометров и с погрешностью $\pm 0,2 - \pm 0,3\%$ они используются как прецизионные приборы в качестве вторичных эталонов при сличении средств термоскопирования.

Способ сравнения эффективно применяется в пирометрах спектрального отношения (цветовые). В них определяется яркость скопируемого теплового поля (его излучения) на двух различных длинах волн. При этом если соответствующие значения коэффициентов излучения для этих двух волн достаточно близки между собой, то результат измерения практически не зависит от абсолютной величины коэффициента излучения, так как непосредственно сравниваются яркости. При больших диапазонах измерений с хорошей точностью (точнее радиационных) в таких способах требуются поверхности со стабильным коэффициентом поглощения.

На информативность термоскопирования по спектральной интенсивности излучения влияет как смещение спектральной интенсивности с повышением температуры в сторону коротких длин волн, так и реальное состояние поверхности. Здесь особо проявляется неопределенность в распределении тепловой энергии на пропускание (в том числе и на глубину) и отражение. Такое распределение в значительной мере зависит от излучательной способности нагретого тела. Поэтому при формировании первичной информации необходимо учитывать диапазон измеряемых температур и спектральные характеристики всех элементов информационно-преобразовательного процесса.

В спектрально-энергетических свойствах теплового поля однозначно проявляются его количественные и качественные характеристики. Информационно-преобразовательные особенности операций формирования и восприятия энергии излучения определяют соответственно способы и средства термоскопии. Среди них определяющее значение имеет радиационная пирометрия. Многофакторная и пропорциональная зависимость теплового излучения в четвертой степени от абсолютной температуры обуславливает высокую чувствительность, но усложняет структурно-алгоритмическую реализацию способов оптического и радиационного термоскопирования.

Пироскопическая техника создает первичное изображение излучающего источника (теплового поля) непосредственно на приемнике и тем самым делает скопирование потока излучения практически независимым от расстояния между излучателем и приемником. Такая операция выполняется на основе оптических законов восприятия и формирования изображений. И здесь особое значение имеют первичные системы визирования, обеспечивающие согласованную работу приемно-преобразовательных устройств и источников информативного излучения, включая его спектрально-энергетические возможности. При этом структурно различают спектрально-оптические (частичного излучения или излучения в узкой полосе частот) и радиационные (полного излучения – во всем диапазоне частот).

В способах спектрального отношения за счет сравнения интенсивностей излучения в двух и более участках спектра с эффективными длинами волн λ_1 и λ_2 реализуются способы с лучшими метрологическими характеристиками технических средств. Для них результаты скопирования не зависят от расстояния до излучающей поверхности, ее размеров и с более широким диапазоном визирования. Реализация способов строится на двухканальных схемах преобразований и получением результата по соотношению сигналов при обработке.

В отличие от цветовых в радиационных пирометрах используется весь спектральный (полный) диапазон излучения, хотя на практике такой диапазон составляет не менее 90% всего спектра излучения [4]. При сравнительно большом диапазоне измерений (-50°C и выше 2000°C) в таких способах термоскопии требуется стабильное значение полного коэффициента излучения, так как и в этом случае измеряется относительная радиационная температура (относительно абсолютно черного тела). Компенсационные схемы коррекции в таких способах сложнее, чем у спектральных, что огра-

ничивает области практического применения радиационных пирометров для поверхностей с высоким колеблющимся коэффициентом излучения [5].

Излучательная способность зависит как от температуры, так и от состояния поверхности и угла визирования. В термоскопии высоких температур широко применяются бесконтактные способы на основе яркостных пирометров, пирометров суммарного и частичного излучения и пирометров спектрального отношения [6].

В монохроматических пирометрах с фотоэлектрическим преобразованием, как и в цветowych, для повышения точности вводят поддиапазонные преобразования, что повышает порог чувствительности и линейность. Термоскопия на основе многодиапазонных (многоспектральных) пирометров особенно перспективна в структурах с оптоволоконными и телевизионными системами. Однако приемлемая точность термоскопирования требует специальной калибровки в определенном, достаточно узком температурном диапазоне. Такая особенность ограничивает применимость термоскопов в условиях многономенклатурных объектов и разнообразия температурных режимов.

Целый ряд задач термоскопии связан с обнаружением внутренних локальных отклонений от технологически нормируемых свойств. Локальное изменение коэффициентов температуро- и теплопроводности, отражательной способности и удельной теплоемкости проявляется в количественных и качественных характеристиках дефектных зон в объектах контроля. На этой основе строятся различные способы теплового неразрушающего контроля [3].

Локальный выброс на тепловом поле, как и локальное излучение, возникающее в процессе эксплуатации изделий или в теплофизическом воздействии, рассматриваются как источники первичной информации. Способы термоскопирования по интенсивности (амплитуде) имеют ряд существенных недостатков. Реальные поверхности и окружающая среда выступают источниками помех, обусловленные флуктуациями коэффициентов поглощения и излучательной способности. Такие помехи усложняют выявление и оценку информативных параметров теплового поля, защиту информационно-преобразовательных каналов, ограничивают чувствительность методов и проявляемость локальных отклонений.

В современных информационно-измерительных средствах задачи термоскопии рассматриваются и решаются с использованием способов и схем локализации, разложения и передачи изо-

бражений тепловых полей на основе их ИК диапазона. При этом в ИК излучении однозначно отображаются количественные и качественные характеристики теплового поля. Спектральным распределением и интенсивностью излучения определяются температура и другие характеристики объекта теплового скопирования. По спектральному составу ИК излучения, его интенсивности и картине теплового поля более достоверно идентифицируются, включая и распознавание, многообразные технические объекты и технологические отклонения. В тепловой картине объекта отображаются не только поверхностные свойства, но и его внутреннее состояние. При этом тепловое распределение характеризует технологические и структурные изменения параметрических свойств объектов. Оно позволяет выявлять направление кристаллизации и наличие напряженностей при плавке, прокате, термической обработке и других операций литья и металлургии [6, 7].

Определенную стабильность и помехозащищенность обеспечивают способы термоскопии со световодным преобразованием и дистанционной передачей. Световодные каналы с жесткими и гибкими волоконно-оптическими элементами позволяют реализовывать различные схемные комбинации информационно-преобразовательной цепи с первичными преобразователями и пирометрами спектрального отношения. За счет предварительного подогрева торца погружаемого огнеупорного блока улучшаются динамические и эксплуатационные характеристики [9].

Оптические моноволокна с их специфическими особенностями каналирования и разделения воспринятого излучения на элементарные лучистые потоки создают дополнительные структурно-функциональные возможности выявления теплового контраста и схемных преобразований информации. При этом светопроводящие волокна используются не только в качестве оптической среды переноса воспринятого на входе излучения, но и как структурные элементы различных схемотехнических реализаций. В одних случаях моноволокна разделяются, группируются и объединяются в коллекторы для проведения определенных структурно-алгоритмических преобразований, в других – для работы в качестве термочувствительных каналов. В этих случаях чувствительный элемент канала представляет собой структуру световод – слой кремния – световод или структуру в виде световод – слой кремния – зеркальная поверхность. Соответственно таким структурам строятся оптоволоконные датчики проходного или отражательного типов. Техника и технологии во-

локонной оптики в общем случае расширяют функциональные возможности и области применения оптико-электронных средств и способов термоскопии [10].

Применимость оптоволоконных способов и средств термоскопии обусловлена особенностями окружающих условий и структуры преобразовательного процесса. При наличии посторонних высокотемпературных воздействий, электромагнитных помех, в задымленных и запыленных условиях и ограниченном доступе к тепловым полям волоконная оптика позволяет каналировать и фильтровать скопируемое излучение поверхности и направленно передать для дальнейших преобразований.

Преимущества волоконной оптики в термоскопии проявляются не только на уровне восприятия первичной информации. Световодные жгуты как многоэлементные системы группирования и разделения оптических моноволокон эффективно разделяют элементарные лучистые потоки и путем схематехнических манипуляций позволяют реализовать различные операционные преобразования и в термоскопии. Множество моноволокон и элементарных лучистых потоков обеспечивают особые условия для создания многообразных способов и средств термоскопирования применительно к узкоспециализированным задачам и требованиям производств и отраслей.

Значительными преимуществами отличаются многоканальные волоконно-оптические термометры со световодными разветвителями, с распределением и ориентацией каналированных излучений от двух источников к термочувствительному элементу и фотоприемнику. Изменение температуры воспринимается термочувствительным элементом и по изменению его коэффициента отражения оценивается текущее состояние теплового поля. В различных модификациях таких термометров за счет технологических изменений формы и размеров (конфигурации) термочувствительного элемента и приемных торцов световодов добиваются улучшения метрологических характеристик приборов [11, 12].

Схемные манипуляции с гибкими световодами позволяют строить дистанционные пирометры для работы в условиях воздействия сильных электрических и магнитных полей, химически агрессивных сред в радиационных и взрывоопасных условиях. В оптической схеме датчика температуры приемные торцы осветительного и информационного световодов расположены в термочувствительной капсуле с зеркально отражающим дном, а другие концы этих световодов пространственно

ориентированы на источник света и фотоприемник. За счет исключения из информационно-преобразовательной цепи термочувствительного элемента с селективной спектральной характеристикой снижается дестабилизирующее влияние флуктуаций спектрально-энергетического излучения источника, чем повышается точность при снижении технико-экономических затрат [13, 14].

Наряду с необходимостью учета спектральных характеристик дестабилизирующих воздействий (дыма, пыли, паров воды и т. д.) для термоскопии особенно значим учет воздействия (влияния) на информативное излучение рассеянного и (или) отраженного от других объектов как источников паразитных засветок (освещенность в условиях цеха, излучение других печей, излучения свода и т. д.). Для движущегося или изменяющегося теплового поля пространственно-временное различие в термоскопировании значимо при создании идентичных каналов преобразовательных процессов, что усложняет градуировку и поверку, особенно пирометров по излучательной способности. Специфический учет свойств и излучательной способности отдельных материалов также требует особого спектрально-энергетического согласования пирометров и структур при анализе и синтезе оптико-электронных каналов термоскопов.

Отдельную группу средств термоскопии составляют технологически и конструктивно усовершенствованные приборы контактно-бесконтактных измерений [15, 16]. Путем пространственно-ориентированного приема теплового излучения с последующей фильтрацией и модуляцией информативной составляющей эффективно реализуется схема ее сравнения с излучением эталонного источника теплового излучения. В таких способах требуются высокостабильный теплоизлучатель и эталонный (опорный) преобразовательный канал, что представляет некоторые метрологические и конструктивные сложности.

На усовершенствовании конструкции и технологий реализуются способы и устройства термоскопии с помощью специальных термоэлементов, подбора их материалов и сред. Используя смеси порошков, люминесцентные термочувствительные элементы (стекло активированное иттербием) по форме и размерам подбирают с учетом параметров приемного торца световода. Дифракционные решетки и другие конструктивные элементы выделяют пропорциональную температуре амплитуду, хотя бы на двух длинах волн, и по соотношению данных амплитуд и соответствующих им сигналов блок обработки выдает фактическую температуру [17, 18].

В перспективных фототелевизионных и стробоскопических системах скопирования тепловых полей особую сложность представляет спектрально-энергетический анализ (обработка) тепловых изображений. При некоторой общности различия способов термоскопирования в основном проявляются в операциях образования видеосигнала. В их основе лежат процессы преобразования потока излучения в электрический сигнал, накопления информации и развертки изображения. Используемый принцип накопления энергии является эффективным приемом борьбы с шумом (помехами), что обусловлено различием законов суммирования повторяющегося сигнала и хаотического шума. Некоторое уменьшение влияния помех в таких способах достигается за счет рациональной пространственно-частотной характеристики считывающего сканера. В большинстве случаев на сканирование и особенно передачу спектрально-энергетической информации влияют форма и размеры изображения, ориентация, скорость и траектория перемещения. При этом учитываются как особенности теплового поля и его восприятия, так и размеры приемника, чем ограничивается количество лучистой энергии и чувствительность первичного элемента.

С использованием оптоволоконных технологий предложены способы термоскопии на основе регистрации, зависящей от температуры длительности остаточной флуоресценции. Эффекты флуоресценции и фотолюминесценции проявляются в некоторых соединениях редкоземельных элементов. При облучении таких соединений ультрафиолетовым излучением возникает флуоресцентное излучение уже в диапазоне 0,5–0,63 мкм и длительность после свечения однозначно определяет температуру. Оптоволоконные датчики температуры работают в диапазоне температур от нуля до 100 °С и обеспечивают точность измерений $\pm 0,02$ °С [18].

Миниатюрные волоконно-оптические датчики температуры преимущественно строятся на использовании интенсивности излучения теплового поля, так называемые датчики амплитудного типа. Эффекты поглощения или отражения излучения при изменении температуры особенно проявляются в некоторых средах, используемых в качестве термочувствительных элементов световодных датчиков. В оптическую цепь преобразований встраивается термочувствительный элемент, зажатый между осветительным световодом, связанным с источником излучения и информационным световодом, выход которого ориентирован на фотоприемник. Более эффективно датчик работает на длине волны $\lambda = 0,88 \pm 0,15$ мкм в температурном диапазоне – 10–300 °С с погрешностью $\pm 0,5\%$ и быстродействием не хуже 2 с. Дистанционность и помехозащищенность, малые массогабаритные параметры, пассивность и нечувствительность к электромагнитным воздействиям обеспечивают таким датчикам перспективу применения в ряде отраслей промышленности с похожими задачами термометрии [19].

Структурно-алгоритмическая реализация фототелевизионных и стробоскопических способов связана с необходимостью обеспечения максимального использования воспринятой лучистой энергии. Это накладывает особые ограничения на выбор структуры, функциональных элементов, их параметров и конструктивного исполнения всей системы. Однако для фотометрических и телестробоскопических систем особую проблему составляют спектрально регулируемые источники излучений и спектрально распределенный прием отображения теплового поля. Лазерно-телевизионные системы видеонаблюдения и телевизионного «фотографирования» (стробоскопирования) улучшают информационные возможности при необходимости оптимального согласования спектрально-энергетических характеристик всех системно объединенных функциональных элементов.

Литература

1. Демченко Е. Б., Марукович Е. И. Непрерывное литье заготовок из чугуна для машино- и станкостроения. Мн.: БНТУ, 2006.
2. Соcнин Ф. Р. Неразрушающий контроль: справ. в 7-ми т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 1: В 2-х кн.: Кн. 1: Визуальный и измерительный контроль. М.: Машиностроение, 2003.
3. Неразрушающий контроль. В 5-ти кн. Кн. 4. Контроль излучениями: практ. пособ. / Б. Н. Епифанцев, Е. А. Гусев, В. И. Матвеев и др.; под ред. В. В. Сухорукова. М.: Высш. шк., 1992.
4. Измерения в промышленности. Справ. изд. В 3-х кн. Кн. 2. Способы измерения и аппаратура: Пер. с нем. / Под ред. П. Профоса. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1990.
5. Герашенко Д. А. Тепловые и температурные измерения. Киев: Наукова думка, 1965.
6. Гусев Г. В., Хазаров В. Г. Измерения высоких температур в промышленности бесконтактными пирометрами // Промышленные АСУ и контроллеры. 2006. № 5. С. 47–51.
7. Катус Г. П., Чубаров Е. П. Современные методы и системы контроля температурных полей // Приборы и системы управления. 1971. № 10. С. 17–21.

8. П о с к а ч е й А. А., Ч у б а р о в Е. П. Оптико-электронные системы измерения температуры. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1988.
9. Пат. RU № 2029259 С1. Устройство для измерения температуры расплава в тигле и способ измерения температуры расплава в тигле / В. Д. Сергеев, Б. Е. Карасев, Л. И. Шалыгин.
10. Пат. на полезную модель № 31447 RU / Ф. А. Егоров, В. Т. Потапов, В. Д. Бурков и др.
11. Пат. RU № 2272259 С1. Волоконно-оптический термометр / Е. Ф. Егоров, В. Т. Потапов, А. П. Неугодииков и др.
12. Пат. RU № 2008630 С1. Волоконно-оптический датчик температуры / Г. Д. Дворников.
13. Пат. RU № 2238529 С1. Способ бесконтактного измерения температуры поверхности нагретых тел / В. А. Тюрин, П. Л. Алексеев.
14. Г о р д о в А. Н. Основы температурных измерений. М.: Наука, 1992.
15. Пат. RU № 2149366 С1. Способ бесконтактного измерения температуры / С. А. Дворецкий, С. А. Дулин, Н. Н. Михайлов и др.
16. Пат. RU № 2241211. Датчик температуры и устройство для измерения температуры / П. И. Садовский, И. Л. Воробьев, А. А. Изынеев.
17. Пат. RU № 2006130456 А. Устройство для измерения температуры в металлических расплавах / М. Кендалл.
18. Пат. RU № 2006113468 А. Способ измерения температуры металла в зоне взаимодействия высококонцентрированного потока энергии с металлом / В. А. Звездин, А. Т. Галиакбаров, Д. А. Башмаков и др.
19. Г а р м а ш В. Б., Е г о р о в Ф. А., К о л о м и е ц А. Н. и др. Возможности, задачи и перспективы волоконно-оптических измерительных систем в современном приборостроении // Спецвыпуск «Фотон-экспресс». Наука, 2005. № 6. С. 128–140.