

Разработка мультиспектрального видеозонда для выявления посторонних веществ при неразрушающем контроле труднодоступных полостей

* В.И. БАТШЕВ^{1,2}, А.С. МАЧИХИН¹, А.В. КРЮКОВ^{1,2}, А.С. БЕЛЯЕВА^{1,3,4},
И.А. БАЛАНДИН¹, В.Н. СОЛОВЬЁВ⁵, М.Ю. МИНЕНКОВ⁵,
Д.А. ШУМАКОВА⁵, Е.Ю. КУЛЬКОВ⁵, В.Э. ПОЖАР^{1,2}

¹ Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН (НТЦ УП РАН), Москва

² МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

³ Университет ИТМО, Санкт-Петербург

⁴ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (СПб ГУАП), Санкт-Петербург

⁵ НПО «Техномаш» им. С.А. Афанасьева, Москва

* E-mail: batshev.vi@ntcup.ru

Аннотация

Рассмотрена задача обнаружения и идентификации следов посторонних веществ на поверхности труднодоступных полостей сложных промышленных объектов. Разрабатываемый мультиспектральный видеозонд позволит наблюдать участок объекта в разных участках спектра, что даст возможность по спектральным свойствам различать следы разных веществ. Особенностью этого устройства – в одномоментной регистрации всей оптической спектральной и пространственной информации, что избавляет от необходимости жёсткой фиксации зонда относительно объекта. Описаны оптические системы устройства в целом и его спектрального регистрирующего модуля. Проведён анализ качества изображения. Указана перспективность применения таких устройств для неразрушающего контроля внутренних полостей промышленных устройств и систем.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, видеозонд, спектральная визуализация, расчёт оптической системы, цифровая обработка изображений.

Введение

Эндоскопический визуально-измерительный контроль – обязательная процедура на разных этапах жизненного цикла многих сложных промышленных объектов: авиационных и ракетных двигателей, трубопроводов, теплообменников и т.п. [1, 2]. Зачастую для принятия обоснованного решения

по наличию и характеру дефекта недостаточно регистрировать и анализировать лишь цветное изображение исследуемой поверхности. С целью повышения информативности контроля в эндоскопическом оборудовании могут предусматриваться дополнительные аналитические возможности. Так, для контрастной визуализации и классификации наблюдаемых веществ могут применяться методы спектрального анализа излучения, нашедшие применение как в технической [3, 4], так и медицинской [5] эндоскопии.

В медицинской практике разработаны методы эндоскопической визуализации, в которой для получения изображений задействованы только те узкие участки спектрального диапазона, в которых целевые элементы исследуемого объекта отображаются наиболее контрастно (*Narrow-band Imaging, Flexible Spectral Imaging Colour Enhancement* и др.) [6–8]. Спектральную селекцию при этом осуществляют путём установки узкополосных оптических фильтров в канал подсветки или приёмный канал эндоскопического зонда. Шагом развития спектральных методов в эндоскопии является применение методов мульти- и гиперспектральной съёмки, обеспечивающих получение гиперкуба – трёхмерного массива данных $I(x, y, \lambda)$, где I – интенсивность оптического излучения на длине волны λ в пикселе с координатами x и y . Для получения такого массива существует несколько основных методов [9], которые можно разделить на методы со сканированием по спектру (*spectral scanning*) и методы с однокоординат-

ным (*pushbroom*) и двухкоординатным (*whiskbroom*) сканированием по пространству, а также методы без сканирования (*single shot*).

В эндоскопии получили применение методы видеоспектрометрии как с пространственным [5], так и со спектральным [4] сканированием. Принципиальное свойство и тех и других – одновременность регистрации данных, причём за полное время съёмки приёмная (дистальная) часть эндоскопического зонда может значительно смещаться относительно исследуемого объекта [10], что делает затруднительным совместную обработку получаемых данных. Поэтому в тех многочисленных задачах, где эндоскоп не может жёстко фиксироваться, а также при исследовании подвижных, например живых, объектов, предпочтителен метод одномоментной регистрации. Однако известные эндоскопические устройства для мультиспектральной съёмки без сканирования обладают довольно большими габаритами спектральной части [11, 12], что делает практически невозможным их использование в диагностике технических объектов в цеховых и полевых условиях.

В настоящей работе исследована возможность создания компактного устройства для одномоментной регистрации мультиспектральных изображений с компактной приёмной (проксимальной) частью, которое могло бы эффективно использоваться в технической эндоскопии без применения вспомогательных фиксирующих приспособлений (стола, штатива и т.п.). В основу положена оригинальная схема двухканального эндоскопа, формирующего одновременно широкополосное (цветное) изображение и несколько спектральных изображений. Компонировка устройства во многом определяется ограничением по диаметру зонда, который не должен превышать диаметра предусмотренных в контролируемых устройствах технологических отверстий (≤ 8 мм). Ниже представлены схемы устройства и его спектрального модуля, а также оценки его оптических (абберационных) характеристик и перспективы использования устройства.

Оптическая схема

Оптическая система устройства реализует метод регистрации серии

спектральных изображений без сканирования. Этот метод обеспечивает сокращение времени съёмки по сравнению со сканирующими приборами за счёт распараллеливания светового сигнала: световой пучок делится на отдельные пучки, каждый из которых проходит через узкополосный фильтр и образует спектральное изображение на λ , определяемой соответствующим фильтром. Такой подход эффективно реализуем при относительно небольшом числе спектральных каналов. При этом площадь матричного приёмника излучения (МПИ) делится на число каналов и потому максимальное число пространственно разрешимых точек изображений также снижается в сравнении с числом пикселей всей матрицы. Таким образом, одновременная регистрация осуществляется за счёт сокращения количества регистрируемой информации – ограничений числа спектральных каналов и пространственного разрешения каждого спектрального изображения.

Выбор спектральных каналов осуществляется в соответствии с априорной информацией о возможных спектрах отражения объекта. Для конкретного производства или технологического процесса номенклатура веществ, используемых на его разных стадиях, строго регламентирована. С учётом того, что при нормальном протекании рабочего цикла стенки объекта в момент контроля должны быть чисты от искомых веществ, можно также допустить, что смешение этих веществ маловероятно. При такой постановке задачи оказывается, что информации, получаемой мультиспектральной камерой за один кадр, вполне достаточно и для обнаружения загрязнений, и для их идентификации из списка используемых веществ.

В разрабатываемом эндоскопе (рис. 1) формируются 16 спектральных каналов с полосой по 20–30 нм, покрывающих диапазон 420–750 нм. Компактность устройства достигается за счёт такой компоновки оптической системы, в которой широкополосное изображение формируется на миниатюрном МПИ 6 в дистальной части эндоскопического зонда, а модуль регистрации спектральных изображений 10 располагается в проксимальной части – в рукоятке.

Основными узлами эндоскопа являются: оптико-электронный эндоскопи-

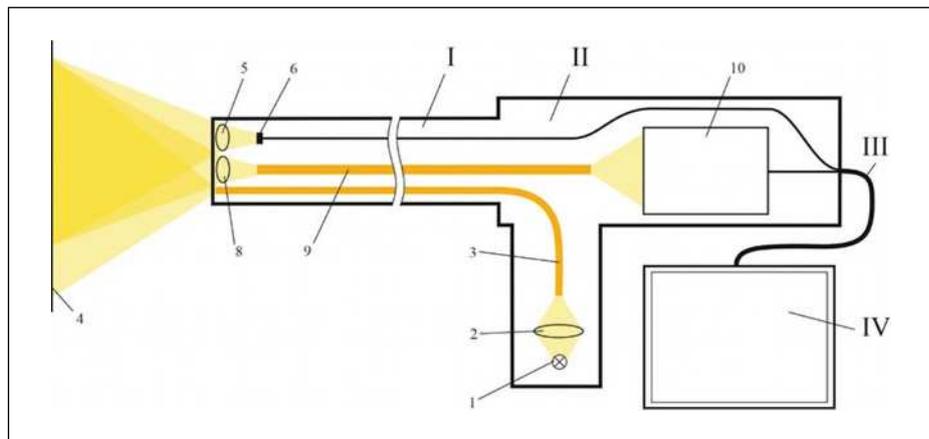


Рис. 1. Предлагаемая оптическая схема эндоскопа

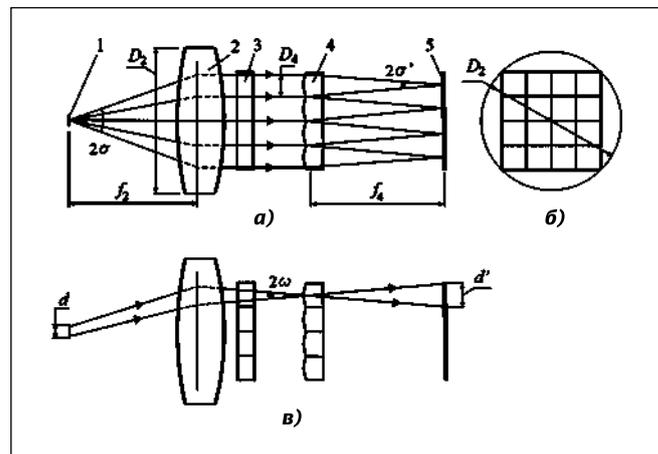


Рис. 2. Спектральный модуль:
а – оптическая схема с ходом лучей, идущих из центра предмета;
б – апертура раstra;
в – схема с ходом лучей из краёв предмета в одном спектральном канале

ческий зонд I, рукоятка II, электронный тракт III и блок управления IV. Информация об объекте получается следующим образом. Свет источника излучения 1 собирается объективом 2 в волоконный жгут 3, уложенный внутри зонда I. Свет падает на поверхность объекта 4, а после отражения от него фокусируется объективом 5 на миниатюрном МПИ 6 и преобразуется в электрический сигнал, который передается по кабелю через весь зонд I, рукоятку II и электронный тракт (кабель) III в блок управления IV. Полученное изображение служит для наведения на разные участки объекта. Одновременно с этим объектив 8 фокусирует изображение того же объекта на торец оптоволоконного жгута 9 с регулярированной укладкой волокон. Жгут переносит изображение на противоположный торец, на который сфокусирован модуль регистрации спектральных изображений 10, в котором формируются спектральные изображения на нескольких λ , и после преобразования в электрические сигналы спектральные изображения передаются в блок управления IV. Последний содержит

одноплатный компьютер с оригинальным специализированным программным обеспечением, которое позволяет отображать на мониторе изображения объекта и дополнительную информацию, получаемую в результате анализа регистрируемых данных.

Спектральный модуль

Спектральный модуль служит ключевым элементом разрабатываемого мультиспектрального видеэндоскопа. Он представляет собой мультиспектральную камеру и проекционный объектив, фокусирующий изображение на её сенсор. Предпочтительный вариант реализации этой камеры – камера, сенсор которой покрыт мозаичным светофильтром, подобным фильтру Байера, но с большим числом спектральных каналов меньшей ширины. Преимущество такого решения в том, что такие мультиспектральные камеры серийно выпускаются (*Ximea, Silios Technologies*) и могут легко интегрироваться в разрабатываемый эндоскоп. Однако число спектральных каналов, их положение и ширина фик-

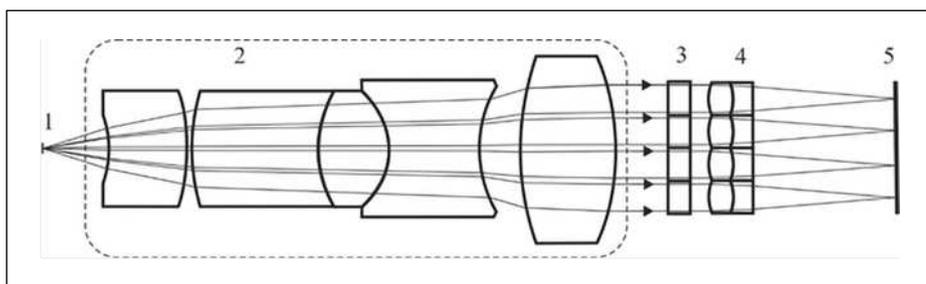


Рис. 3. Принципиальная оптическая схема спектрального модуля

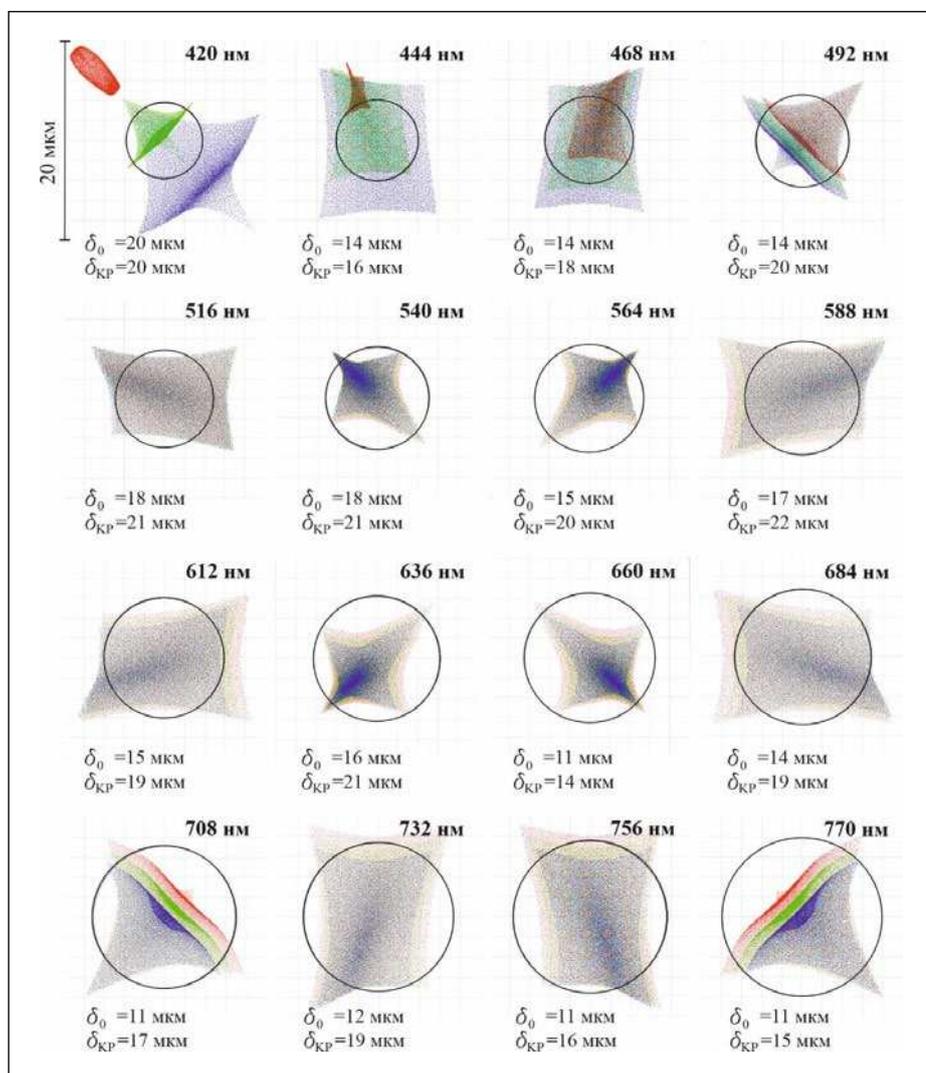


Рис. 4. Диаграммы пятен рассеяния

сированы и не могут адаптироваться под конкретную решаемую задачу. Учитывая это и то, что мультиспектральные камеры данного типа выпускаются исключительно за рубежом, целесообразно использовать монохромный МПИ, на разные участки которого посредством линзового раstra одновременно проецируются несколько изображений, каждое из которых пропускается через индивидуальный узкополосный светофильтр (рис. 2). Подобная оптическая схема уже была

предложена для измерений пространственного распределения температуры и излучательной способности [13].

Изображение объекта с торца оптоволоконного жгута 1 коллимируется объективом 2, проходит через мультиспектральный растр 3, представляющий собой массив 4×4 светофильтров квадратной апертуры (рис. 2, б). Следом за этим растром располагается линзовый растр 4 такой же апертуры, каждый элемент которого фокусирует изображение на МПИ 5. Соответст-

венно, на МПИ одновременно формируются 16 неперекрывающихся спектральных изображений объекта.

Совместная обработка цифровых изображений позволяет рассчитывать спектральный состав излучения, прошедшего от любой точки наблюдаемого участка объекта. При использовании МПИ с разрешением 2048×2048 пикселей разрешение каждого отдельного спектрального изображения составит 512×512 пикселей. С учётом разрешения оптоволоконной и аббераций оптической системы реальное пространственное разрешение оказывается на уровне 150×150 элементов. Однако и такой степени детализации достаточно, так как оператор может ориентировать зонд по изображению, сформированному в широкополосном канале, а спектральные изображения необходимы, прежде всего, для построения спектров отражения участков исследуемых объектов с целью обнаружения веществ-загрязнителей и их идентификации.

В разрабатываемом устройстве планируется использовать оптоволоконный жгут диаметром $d = 1,4$ мм с числовой апертурой $NA = 0,4$. Размер МПИ составляет $11,3 \times 11,3$ мм², так что размер элемента раstra D_4 и, соответственно, размер одного изображения составляют 2,8 мм. Изображения торца волокна представляют собой окружности, расположенные в пределах соответствующих участков МПИ. Диаметр коллимирующего объектива, покрывающий весь растр, $D_2 = 16$ мм.

Анализ оптических характеристик

Качество изображения у оптической системы определяется двумя факторами: дифракцией света на апертурной диафрагме и геометрическими aberrациями. Разрабатываемая оптическая система обладает рядом специфических свойств:

- наличием раstra, каждый элемент которого смещён относительно оси коллимирующего объектива, причём величины смещения элементов различаются;

- весьма узкой спектральной шириной каждого из каналов.

Как показал расчёт, даже при относительно узкой полосе (до 30 нм) спектральные каналы невозможно считать квазимонохроматическими,

так как сказывается хроматизм увеличения. Эта геометрическая аберрация, вносимая элементом растра в виде одиночной линзы, проявляется в виде различия размеров изображений, построенных на разных длинах волн. Широко используемый подход, основанный на компенсации аберрации одного компонента аберрациями другого, не работает. Хроматизм увеличения зависит от положения входного зрачка [14], а зрачки элементов растра смещены на разные величины, поэтому эту аберрацию нельзя компенсировать аберрацией коллимирующего объектива. Поэтому необходимо исправить хроматизм увеличения и в коллимирующем объективе, и в растре независимо. По этой причине в качестве элемента растра планируется использовать склеенный двухлинзовый компонент, хроматические аберрации в котором значительно меньше, чем в однолинзовом.

Параметры оптической схемы (рис. 2) могут определяться из следующих соображений. Поскольку хроматизм увеличения, как и другие аберрации наклонных пучков лучей, прямо пропорционален полевому углу ω , то его уменьшение возможно путём увеличения фокусного расстояния f_4 , согласно выражению

$$\operatorname{tg} \omega = \frac{d'}{2f_4}.$$

При этом, однако, увеличение f_4 при фиксированном диаметре элемента растра D_4 приводит к снижению заднего апертурного угла σ' и, как следствие, освещённости изображения и росту влияния дифракции на качество изображения, а значит, существует оптимальное значение f_4 . Аберрационный расчёт, выполненный в программе «ZEMAX», показал, что в двухлинзовом объективе, состоящем из линз со сферическими поверхностями, изготовленными из бесцветного оптического стекла, оптимально относительное отверстие $D_4/f_4 = 1:11$, то есть $f_4 = 30$ мм. При этом $\omega = 2,5^\circ$, $\sigma' = \arctg(D_4/2f_4) = 2,7^\circ$, а диаметр аберрационного кружка рассеяния, обусловленный хроматизмом увеличения, кривизной поля и другими аберрациями, $\delta \approx 10$ мкм.

Диаметр дифракционного рассеяния точки (кружка Эйри) δ_{Airy} , который является минимально возможным кружком рассеяния изображения

точки оптической системой, зависит от λ и σ' :

$$\delta_{Airy} = \frac{1,22\lambda}{\sin \sigma'}.$$

В пределах рабочего спектрального диапазона 420–750 нм δ_{Airy} варьируется от 11 до 20 мкм.

Другой параметр – фокусное расстояние коллимирующего объектива f_2 выбран равным 20 мм по следующим причинам. С одной стороны, это обеспечивает величину относительного отверстия $D_2/f_2 = 1:1,25$, что позволяет реализовать объектив в виде не очень сложной пятилинзовой системы, а с другой – даст достаточное увеличение изображения m , которое, по формуле

$$m = f_4/f_2,$$

составляет 1,5. Диаметр изображения торца оптоволоконного жгута d' рассчитывается по формуле

$$d' = d \cdot m$$

и составляет 2,1 мм, что вписывается в размер участка МПИ, равный $2,8 \times 2,8$ мм².

Принципиальная оптическая схема полученного устройства регистрации спектральных изображений представлена на рис. 3.

Для оценки качества оптической системы на рис. 4 приведена диаграмма пятен рассеяния центральной точки предмета, лежащей на оптической оси. Приведены также диаметры пятен, в которых концентрируется 80 % энергии излучения, идущей из центральной (δ_0) и крайней ($\delta_{кр}$) точек предмета. Чёрными линиями показаны кружки Эйри, диаметры которых различны из-за различий по λ .

Из рис. 4 видно, что диаметры пятен рассеяния $\delta \leq 22$ мкм, что в пределах диаметра изображения $d' = 2,1$ мм обеспечивает количество разрешимых элементов N порядка 100.

Заключение

Разработана оптическая система мультиспектрального видеоэндоскопа, в котором устройство регистрации спектральных изображений основано на использовании линзового и мультиспектрального растров. Преимущество такого устройства – компактность, одновременное получение всех спек-

тральных изображений и возможность изготовления мультиспектрального растра с функциями пропускания каналов, выбранными под конкретную задачу, вместо покупки иностранного оборудования с фиксированными спектральными каналами.

Выполненный расчёт оптической системы показал возможность получения приемлемого пространственного разрешения. При этом остаётся возможность улучшения разрешения за счёт усложнения системы: увеличения апертуры коллимирующего объектива и повышения степени его аберрационной коррекции.

Габариты элементов, размещаемых внутри эндоскопического зонда, позволяют сократить диаметр зонда до 8 мм и менее, что позволяет использовать технологические отверстия соответствующего диаметра для доставки устройства к полостям, расположенным внутри инспектируемых объектов. Массогабаритные характеристики проксимальной части эндоскопа допускают его эксплуатацию в цеховых условиях без использования вспомогательных приспособлений (штатива, стола и т.п.), в том числе в задачах неразрушающего контроля авиационных и ракетных двигателей, трубопроводов, теплообменников.

Ещё одно из возможных направлений развития подобных устройств – создание спектрального модуля в виде отдельного блока, который мог бы вставляться в инструментальный канал эндоскопа. Это позволило бы использовать метод одномоментной мультиспектральной съёмки в стандартных технических и медицинских эндоскопах без изменения их конструкции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гурвич А.К., Ермолов И.Н., Сажин С.Г. Неразрушающий контроль. Кн.1. Общие вопросы. Контроль проникающими веществами / Под ред. В.В. Сухорукова. – М.: Высшая школа. – 1992. – 272 с.
2. Мачихин А.С. Измерительные возможности современных видеоэндоскопов // Двигатель. – 2009. – № 3. – С. 8–9.
3. Machihin A., Pozhar V., Batshev V. Compact AOTF-based spectral imaging system for medical endoscopic analysis // Photonics & Lasers in Medicine. – 2013. – Vol. 2, No. 2. – P. 153–157.

4. *Мачихин А.С., Батшев В.И., Хохлов Д.Д., Перфилов А.М., Калошин В.А.* Акустооптический модуль для визуального и спектрометрического эндоскопического контроля // Труды НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко. – 2016. – № 33. – С. 227–238.

5. *Cai F., Gao M., Li J., Lu W., Wu C.* Compact Dual-Channel (Hyperspectral and Video) Endoscopy // *Frontiers in Physics*. – 2020. – Vol. 8. – P. 110.

6. *East J. et al.* Advanced endoscopic imaging: European Society of Gastrointestinal Endoscopy (ESGE) Technology Review // *Endoscopy*. – 2016. – Vol. 48, No. 11. – P. 1029–1045.

7. *Negreanu L. et al.* Progress in digestive endoscopy: Flexible Spectral Imaging Colour Enhancement (FICE)-technical review // *Journal of medicine and life*. 2015. – Vol. 8, Is. 4. – P. 416–422.

8. *Kikuchi O. et al.* Narrow-band Imaging for the Head and Neck Region and the Upper Gastrointestinal Tract // *Japanese Journal of Clinical Oncology*. – 2013. – Vol. 43, No. 5. – P. 458–465.

9. *Metkar M., Kamalapur S.* Hyperspectral Imaging // *Asian Journal of Computer Science Engineering*. – 2016. – Vol. 2, No. 1. – P. 6–10.

10. *Li Q., He X., Liu H., Xu D., Guo F.* Review of spectral imaging technologies in biomedical engineering: achievements and challenges // *J. of Biomedical Optics*. – 2013. – Vol. 18, No. 10.

11. *Jones G.A.* Computational Multispectral Endoscopy // *Medicine*. – 2020. – P. 127.

12. *Kester R.T. et al.* Real-time snapshot hyperspectral imaging endoscope // *Journal of Biomedical Optics*. – 2011. – Vol. 16, No. 5. – Art.n. 056005.

13. *Lim H.-T., Murukeshan V.* A four-dimensional snapshot hyperspectral video-endoscope for bio-imaging // *Scientific Reports*. – 2016. – Vol. 6, No. 24044. – P. 10.

14. *Мачихин А.С., Батшев В.И., Неверов С.М.* Способ бесконтактного измерения пространственного распределения температуры и излучательной способности объектов без сканирования / Патент России № 2721097. 2020. Бюл. № 14.

15. *Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.И.* Теория оптических систем: Учебник для студентов приборостроительных специальностей вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. – 448 с.



Батшев Владислав Игоревич, кандидат техн. наук. Окончил в 2007 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Старший научный сотрудник НТЦ УП РАН, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов:

расчёт оптических систем, акустооптика, приборостроение



Мачихин Александр Сергеевич, доктор техн. наук. Окончил в 2007 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Ведущий научный сотрудник НТЦ УП РАН. Область научных интересов:

приборостроение, неразрушающий контроль, акустооптика, биомедицинская оптика



Крюков Александр Владимирович, кандидат техн. наук. Окончил в 1998 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Научный сотрудник НТЦ УП РАН, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов:

расчёт оптических систем, изобразяющая оптика



Баландин Иван Алексеевич, инженер. Окончил в 2021 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Аспирант НТЦ УП РАН. Область научных интересов:

акустооптическая спектроскопия



Беляева Алина Сергеевна, младший научный сотрудник НТЦ УП РАН, ассистент СПб ГУАП, аспирант Университета ИТМО. Область научных интересов:

расчёт оптических систем, неизобразяющая оптика, колориметрия, акустооптика



Кульков Евгений Юрьевич, инженер. Окончил в 2006 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Ведущий инженер НПО «Техномаш» им. С.А. Афанасьева. Область научных интересов:

пневмогидроиспытания, неразрушающий контроль



Миненков Михаил Юрьевич, инженер. Окончил в 2006 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Ведущий инженер-испытатель НПО «Техномаш» им. С.А. Афанасьева. Область научных интересов –

пневмогидроиспытания, неразрушающий контроль



Соловьёв Виктор Николаевич, кандидат хим. наук. Окончил в 1993 г. МГУ им. М.В. Ломоносова. Руководитель направления НПО «Техномаш» им. С.А. Афанасьева. Область научных интересов:

методы испытаний на прочность и герметичность, технологии обеспечения и контроля промышленной чистоты



Шумакова Дарья Андреевна, инженер. Окончила в 2022 г. МАИ. Инженер-испытатель НПО «Техномаш» им. С.А. Афанасьева. Область научных интересов:

пневмогидроиспытания, неразрушающий контроль



Пожар Витоľд Эдуардович, доктор физ.-мат. наук. Окончил в 1981 г. МФТИ. Заведующий отделом акустооптических информационных систем НТЦ УП РАН. Профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана

и НИЯУ «МИФИ». Область научных интересов: акустооптика, спектрометрия, адаптивная спектроскопия, гиперспектрометрия, дистанционное зондирование, спектральное приборостроение