

Оптическая многоканальная система многоспектрального датчика контроля излучения авиационных двигателей

Ю. А. Новикова✉, М. Б. Рыжиков

Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

✉ nov-jliana@yandex.ru

Аннотация. Предложена схема оптоэлектронного датчика, реализующего многоканальный узкополосный прием в тех областях спектра, которые позволяют определять наличие в пламени авиационных двигателей повышенной концентрации железа, меди и углекислого газа. Предложено два варианта конструкции оптической системы, которые реализуют пространственно-частотную селекцию для излучаемых факелом электромагнитных волн, позволяя регистрировать изменения только на частотах, которые соответствуют пикам излучения, возникающих при наличии определенных металлов или газов. В первой схеме каждый узкополосный оптический канал приема состоит из объектива и дополнительной оптической системы, сформированной из узкополосных многослойных тонкопленочных интерференционных зеркал, реализующих частотную фильтрацию регистрируемых сигналов для заданной длины волны. Во второй схеме используется один входной объектив, а разделение каналов приема осуществляется системой зеркал, задающих разные пути распространения оптического излучения для выбранных длин волн, на которых наиболее сильно меняется интенсивность излучения при эмиссии с поверхности узлов двигателя твердых частиц Fe или Cu либо при изменении концентрации CO₂. В ходе исследования синтезированы интерференционные узкополосные избирательные системы для выделения поддиапазонов как в ультрафиолетовой, так и в инфракрасной области спектра, а также получены их спектральные оптические характеристики.

Ключевые слова: оптическая система, интерференционные покрытия, частотная селекция, спектроскопия, датчик

Для цитирования: Новикова Ю. А., Рыжиков М. Б. Оптическая многоканальная система многоспектрального датчика контроля излучения авиационных двигателей // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 3. С. 55–64. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-3-55-64.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ «Госзадание» (проект FSRF-2023-0003 от 13.01.2023) «Фундаментальные основы построения помехозащищенных систем космической и спутниковой связи, относительной навигации, технического зрения и аэрокосмического мониторинга».

Original article

Optical Multichannel Multispectral Radiation Monitoring Sensor System for Aircraft Engines

Yu. A. Novikova✉, M. B. Ryzhikov

Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia

✉ nov-jliana@yandex.ru

Abstract. A scheme of an optoelectronic sensor is proposed that implements multichannel narrowband reception in those spectral regions that allow determining the presence of increased concentrations of iron, copper and carbon dioxide in the flame of aircraft engines. Two variants of the optical system design have been proposed, which

implement spatial-frequency selection for electromagnetic waves emitted by a torch, allowing changes to be recorded only at frequencies that correspond to radiation peaks occurring in the presence of certain metals or gases. In the first scheme, each narrow-band optical reception channel consists of a lens and an additional optical system formed from narrow-band multilayer thin-film interference mirrors that implement frequency filtering of recorded signals for a given wavelength. In the second scheme, one input lens is used, and the separation of reception channels is carried out by a system of mirrors that specify different paths of optical radiation propagation for selected wavelengths, at which the radiation intensity changes most strongly when solid particles Fe or Cu are emitted from the surface of engine components, or when the concentration of CO₂ changes. In the course of the study, interference narrowband selective systems were synthesized to isolate sub-bands in both the ultraviolet and infrared regions of the spectrum and their spectral optical characteristics were obtained.

Keywords: optical system, interference coatings, frequency selection, spectroscopy, sensor

For citation: Novikova Yu. A., Ryzhikov M. B. Optical Multichannel Multispectral Radiation Monitoring Sensor System for Aircraft Engines // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2025. Vol. 18, no. 3. P. 55–64. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-3-55-64.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Financing: The work was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation «Goszazanie» (project FSRF-2023-0003 dated 01/13/2023) «Fundamental principles of building noise-proof systems for space and satellite communications, carrier navigation, technical vision and aerospace monitoring».

Введение. Развитие и эксплуатация авиационных платформ с газотурбинными двигателями (ГТД) показала, что обеспечить безопасность полетов и экологичность воздушного транспорта можно в том числе предъявлением более жестких требований к системам контроля состава выхлопных газов, позволяющего косвенно оценить эффективности работы двигателя [1]. Для исследования состава факела сопла двигателя можно использовать спектрофотометрический метод, который позволяет анализировать изменения в спектре излучения в инфракрасном (ИК), видимом и ультрафиолетовом (УФ) диапазонах. Это позволяет получить информацию о содержании в выхлопных газах углекислого газа, водяного пара, оксидов азота или о наличии такой концентрации продуктов горения, которая превышает установленные нормы для эффективно работающего, экологичного, исправного газотурбинного двигателя. Кроме того, косвенно в ходе регламентных проверок и эксплуатации можно оценивать потенциальную надежность и качество новых технических решений. Точность диагностики в условиях множества внешних оптических шумовых или случайных помеховых источников можно повысить за счет реализации пространственно-частотной селекции, осуществляющейся в том числе посредством реализации интерференционных оптических фильтров или зеркал с заданными техническими характеристиками [2]. В данной статье предложена оригинальная оптическая система на базе синтезированных интерференцион-

ных тонкопленочных зеркал, позволяющая реализовывать прием излучения только в узких частях спектрального диапазона оптического излучения и приведены результаты синтеза каналов приема датчика для выделения полос в которых наблюдается изменение интенсивности излучения для железа, меди и углекислого газа.

Структурная схема оптических систем датчика. Количество узкополосных частотных каналов, реализуемых в оптической системе, определяется числом исследуемых газов или металлов, которые анализируются в ходе спектрофотометрической диагностики факела двигателя. В настоящей статье предложен датчик, позволяющий проводить анализ излучения на частотах, которые привязаны к областям спектра, где наблюдаются пики повышения или поглощения излучения для контролируемых газов и металлов. Если реализовать частотную селекцию в оптическом тракте, то можно снизить и уровень внешних оптических шумов, вызванных сторонней засветкой.

В [3] показано, что при нормальной работе ГТД спектр излучения факела практически не меняется во времени. Исключение составляют первые ~3 с работы, когда могут выгорать загрязнения из внутриводвигательных полостей. В это время можно зарегистрировать повышенное содержание Fe и Ni, а также присутствие Ca, Mn, Ag, CN. Анализируя спектр факела двигателя, можно обнаружить увеличение эрозии по изменению интенсивности излучения на отдельных частотах, которое проявляется при наличии молекул Fe.

На рис. 1–2 приведены результаты анализа излучения факела двигателя, полученные в [3]. На рис. 1 показан результат спектроскопической диагностики факела в случае увеличения концентрации Fe. На рис. 2 представлены данные для анализа спектра в присутствии молекул Cu.

Из представленных результатов экспериментов следует, что «скачки» в спектрах, появляющиеся при попадании в состав струи Fe и Cu (из которых выполняются многие составные части двигателя), наиболее заметны в ультрафиолетовой области.

Кроме рассмотренных в этой статье металлов, эрозии подвергаются и частицы других металлов, в том числе жаропрочных, входящих в состав специальных нагревостойких сплавов, из которых изготавливаются части ГТД. Среди них с относительно высокой концентрацией можно выделить Co, Cr, Al и Nb [3].

В ИК-области спектра можно анализировать наличие излучения углекислого газа. Его выбросы отличаются повышенным поглощением излучения в трех поддиапазонах: около 2.7, 4.3 и 15 мкм. При этом наиболее широкая область спектральных частот, где наблюдается поглоще-

ние из-за наличия только углекислого газа, расположена в районе 15 мкм [4]. Анализ интенсивности излучения косвенно позволяет отслеживать изменение концентрации CO_2 , что в свою очередь способствует косвенной оценке экологичности разработок перспективных газотурбинных двигателей, которая может проводиться на стадии предварительных испытаний макетов. Для анализа выбросов CO_2 выделен диапазон в районе 15 мкм, поскольку на этой длине волны отсутствует пересечение со спектрами поглощения CO и H_2O [4].

В настоящей статье предложены две оптические схемы для приема и частотной селекции принимаемого излучения от факела двигателя. Первая – более габаритная, но более универсальная с точки зрения потенциального наращивания анализируемых областей частот для обнаружения других металлов, оксидов металлов или газов за счет подключения дополнительных оптически независимых каналов приема, более разбирается подробно. Вторая, менее габаритная и более дешевая, может быть реализована в случае строго определенного набора каналов приема, например

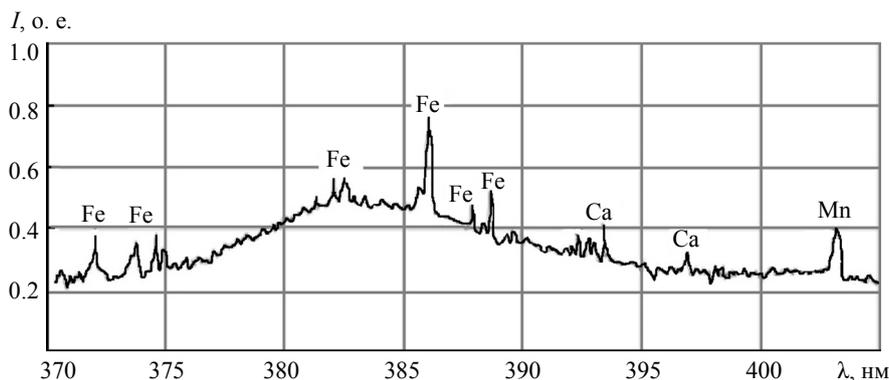


Рис. 1. Зависимость интенсивности излучения I факела двигателя с наличием молекул Fe, Ca и Mn от длины волны λ

Fig. 1. Dependence of the radiation intensity I of an engine flare with the presence of Fe, Ca and Mn molecules on the wavelength λ

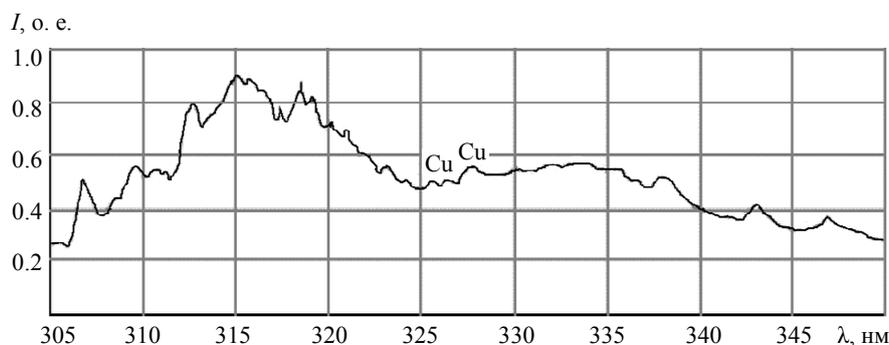


Рис. 2. Зависимость интенсивности излучения I факела двигателя с наличием молекул Cu от длины волны λ

Fig. 2. Dependence of the radiation intensity I of an engine flare with the presence of Cu molecules on the wavelength λ

в случае диагностики только CO_2 , Cu и Fe_2 . Уменьшение габаритов и стоимости во втором случае достигается посредством использования одного объектива в качестве коллиматорной системы, а разделение оптических каналов после этого происходит только за счет использования системы зеркал.

Первым рассмотрим вариант, при котором оптическая система – многоканальная с выделением отдельных спектральных компонент в каждом приемном канале оптического излучения.

Ее структурная схема представлена на рис. 3.

Увеличить информативность рассматриваемого датчика можно посредством добавления визуального канала приема, в том числе трех отдельно разделенных светофильтрами каналов приема (красного, синего и зеленого), как это предложено в [5].

Подобное визуальное наблюдение, в том числе многоканальное, позволяет получить общую картину работы двигателя и выявить возможные пробле-

мы – утечку топлива, неправильное сгорание и т. д. Однако этот метод не позволяет получить подробную информацию об изменениях в спектре излучения факела для проверки случаев эмиссии частиц разных металлов или газов.

Визуальный канал приема может быть реализован как в виде видеокамеры со стробированием по дальности в видимом диапазоне, так и в виде той же видеокамеры, дополненной камерой для получения изображения в ИК-диапазоне. В последнем случае возможно применение комплексирование изображений, выполняемое в соответствии с требованиями и критериями, предъявляемыми к результирующему изображению.

Структура отдельного оптического канала представлена на рис. 4. Исходящий от факела свет проходит через двухлинзовый объектив, служащий коллиматором. Далее лучи, уже идущие параллельно, падают на систему зеркал, двукратно переотражаются и попадают на фотодетектор (ФД).

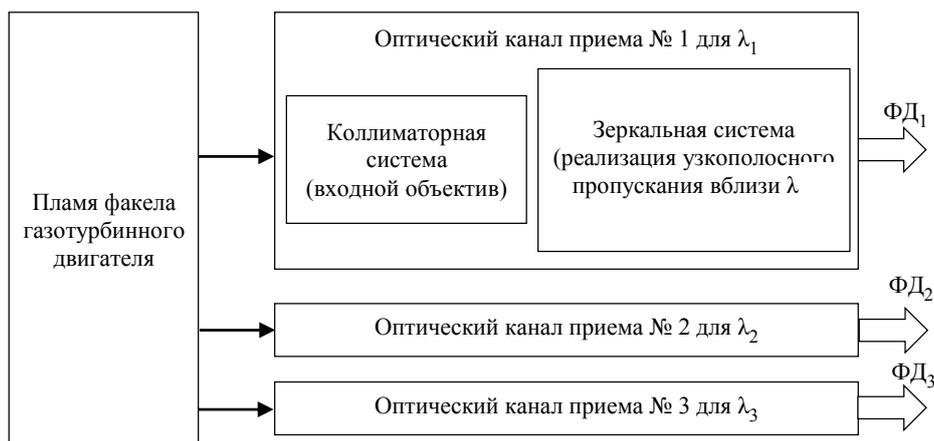


Рис. 3. Структурная схема оптического узла многоканальной системы, ориентированной на спектрофотометрический анализ в пределах трех узких частотных диапазонов

Fig. 3. Block diagram of the optical node of a multichannel system focused on spectrophotometric analysis within three narrow frequency ranges

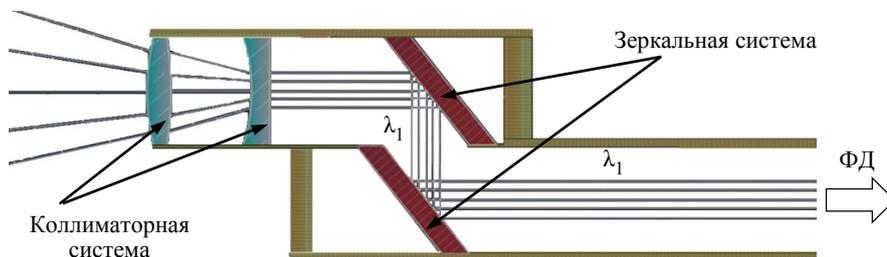


Рис. 4. Структурная схема оптического узла многоканальной системы, ориентированной на спектрофотометрический анализ в пределах трех узких частотных диапазонов (λ_1 – выделяемая длина волны)

Fig. 4. Block diagram of the optical node of a multichannel system focused on spectrophotometric analysis within three narrow frequency ranges (λ_1 – wavelength allocated using the scheme)

Такое двукратное переотражение позволяет увеличить пространственно-частотную избирательность системы и повысить качество подавления излучения вне анализируемого участка длин волн, в котором и начинают происходить изменения интенсивности в случае нештатной работы двигателя, эмиссии твердых частиц или изменениях газового состава факела двигателя.

Возможна и более сложная оптическая система, базирующаяся на принципе разделения путей распространения излучения на разных частотах, которые разделяются с помощью системы интерференционных зеркал. Пример такой оптической системы представлен в [6]. Схема приемного оптического канала с интерференционными зеркалами при рассматриваемом трехчастотном разделении представлена на рис. 5. Ее отличительные черты – наличие широкополосной коллиматорной системы 1, интерференционных зеркал 2, которые эффективно отражают излучение с длиной волны λ_1 , пропускают электромагнитные волны с длиной волн λ_2 и λ_3 , интерференционных зеркал 3, хорошо отражающих лучи с длиной волны λ_2 , но пропускающих излучение на длине волны λ_3 , а также дополнительного интерференционного фильтра 4, служащего для выделения узкой части спектра в окрестностях данной длины волны.

Недостаток такой схемы в том, что количество отдельных приемных каналов, которые могут быть в ней реализованы, ограничивается сложностью разделения световых узкополосных каналов после коллиматорной системы – когда

число разделяемых каналов становится больше трех-четырех, увеличиваются и требования к синтезу интерференционных покрытий и к взаимной юстировке зеркал.

Кроме того, данная приемная система требует коллиматорной системы со значительной широкополосностью для приема оптического излучения как из части УФ-поддиапазона, так из ИК-поддиапазона длин волн. Это требует, в свою очередь, применения особых оптических материалов, которые отличаются прозрачностью для всех выделяемых участков спектра.

Результаты разработки зеркальных систем для каналов обнаружения Fe_2 , Cu и CO_2 . Разработку оптического тракта для схемы на рис. 4 можно разделить на два этапа:

- разработку зеркальной системы;
- разработку коллиматорной системы.

Реализация зеркальной системы требует синтеза интерференционных оптических зеркал, устанавливаемых под углом 45° , отражающих определенную длину волны, но пропускающих остальные электромагнитные волны на других частотах. При этом синтез должен быть осуществлен с учетом отбора подходящих оптических материалов.

Выбирая материалы для первого этапа – синтеза узкополосных отражающих интерференционных фильтров, следует ориентироваться на их механическую прочность и термическую устойчивость. Материалами оптических интерференционных покрытий могут быть металлы, оксиды металлов, вольфрам, титан, алюминий и полупроводники – такие, как кремний и германий.

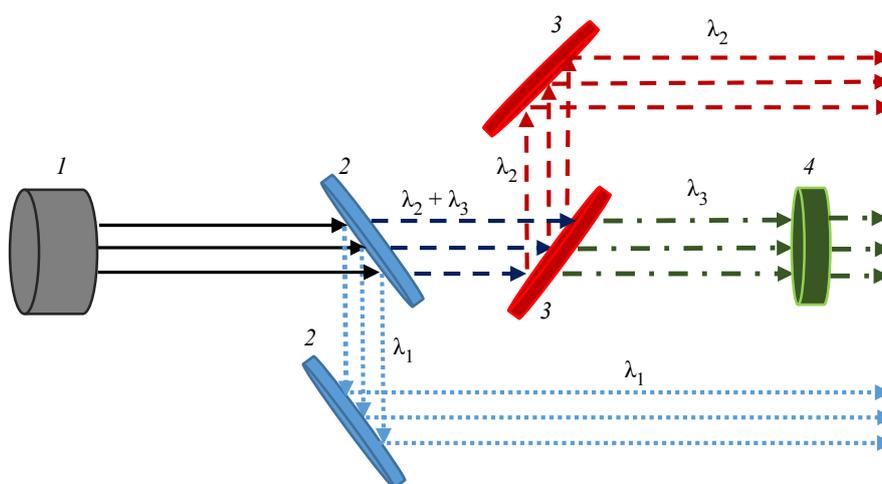


Рис. 5. Структурная схема оптического узла многоканальной системы, ориентированной на спектрофотометрический анализ в пределах трех узких частотных диапазонов (λ_1 , λ_2 , λ_3 – выделяемые с помощью схемы длины волн)

Fig. 5. Block diagram of the optical node of a multichannel system focused on spectrophotometric analysis within three narrow frequency ranges (λ_1 , λ_2 , λ_3 – wavelength allocated using the scheme)

Толщина отражающих покрытий обычно составляет от нескольких нанометров до десятков нанометров, и их толщина связана с отражательной способностью материала покрытия. Чем более высокая отражательная способность нужна, тем больше четвертьволновых слоев и толще покрытие. При этом растет и высота побочных максимумов в спектре коэффициентов отражения интерференционных зеркал. Это в свою очередь ухудшает и эффективность спектрального разделения, когда пики колебаний интенсивности при наличии разных частиц близки друг к другу, как в случае обнаружения Fe (386 нм) и Ca (393 нм) [1].

Существует несколько механизмов снижения этих побочных максимумов, среди которых наиболее распространен способ синтеза с автоматическим подбором слоев неравной оптической толщины, реализуемым посредством использования специального программного обеспечения. Для этого хорошо подходит программа «Film Manager», назначение, функциональные возможности и управление которой подробно описаны в [7]. При равной оптической толщине слоев уменьшить побочные боковые лепестки, появляющиеся в области более высоких значений длин волн можно посредством уменьшения вдвое толщин первого и последнего слоев с высоким показателем преломления [8].

Чтобы синтезировать оптический канал для выделения области спектра, в котором идет обнаружение Fe, была найдена следующая начальная структура для синтеза покрытий зеркал: $H_{0.25}(V_{0.5} H_{0.5})^{m_1}V_{0.25}$ – для первого зеркала; $H_{0.25}V_{0.25}; (H_{0.5} V_{0.5} H_{0.5})^{m_2}V_{0.25}$ – для второго зеркала, где V_x, H_x – слои с высоким и низким показателями преломления толщиной 0.5λ , причем для первого зеркала опорная длина волны $\lambda_1 = 340$ нм, а для второго – $\lambda_2 = 1882.5$ нм; m_1 и m_2 – количества повторов выделенных в круглых скобках подструктур для первого и второго зеркал.

Для каналов обнаружения Fe и Cu в качестве оптических материалов, прозрачных в УФ-области, с низким и высоким показателями преломления были выбраны фторид магния (MgF_2) и оксид гафния (HfO_2), параметры которых можно найти в [9]. В качестве подложки выбиралось кварцевое стекло КУ-1 [10]. Для повышения селективности излучения в районе 300...400 нм можно рекомендовать применение матричных фоточувствитель-

ных приборов с переносом заряда типа «Квадро» [11] с хорошей чувствительностью в рассматриваемом диапазоне длин волн и слабой чувствительностью к излучению в ИК-области спектра.

Для синтеза оптического канала для выделения области спектра, в котором идет обнаружение CO_2 , использовалась та же структура зеркал, что и для канала обнаружения Fe; причем для первого зеркала опорная длина волны $\lambda = 14.1$ мкм, а для второго – $\lambda = 45$ мкм. В качестве подложки использовался ZnSe, а в качестве оптических материалов, прозрачных в ИК-области, с низким и высоким показателями преломления были выбраны PbF_2, ZnS . Для повышения селективности излучения в районе 15 мкм можно рекомендовать применение матричного фотоприемника $Cd_{0.19}Hg_{0.81}Te$ [12]. На рис. 6 представлены результаты расчетов спектральной зависимости коэффициента отражения $R(\lambda)$ для системы из двух интерференционных зеркал, разработанных для канала обнаружения Fe, а на рис. 7 и 8 – результаты моделирования спектральных характеристик зеркал для каналов обнаружения Cu и CO_2 соответственно.

Результаты разработки коллиматорной системы для каналов обнаружения Fe_2, Cu и CO_2 . Реализация коллиматорной системы может быть осуществлена по-разному в зависимости от выбранной схемы исполнения многоканального датчика. Здесь можно выделить два подхода:

– разработка широкополосного входного объектива, который необходим при реализации второй схемы оптического приема, но может быть использован как универсальный и для всех каналов первой схемы приема;

– разработка сменных относительно узкополосных входных объективов, каждый из которых ориентирован на прием излучения в заданной части спектра оптического диапазона. Например, объектив для ультрафиолетового поддиапазона для обнаружения Fe_2 и Cu и объектив ИК-поддиапазона для обнаружения CO_2 .

В случае реализации первого подхода более целесообразно использовать другие возможные каналы приема с более близкими полосами частотного анализа. Так, для обнаружения CO_2 в такой системе можно выбрать спектр анализа вблизи длины волны 4.3 мкм. Это упрощает синтез зеркальной системы и разработку коллиматорной системы.

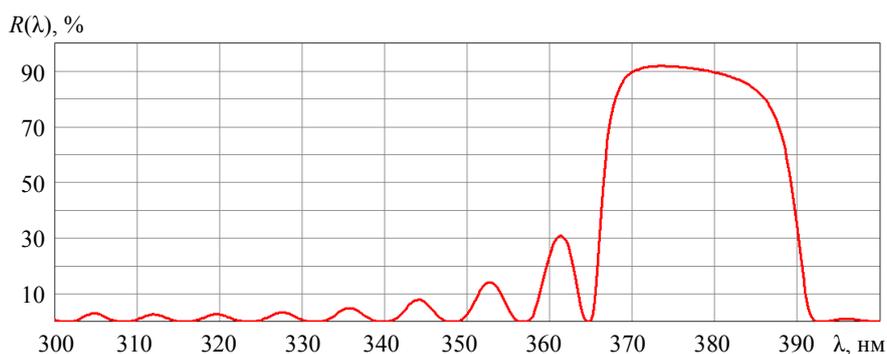


Рис. 6. Спектр коэффициента отражения синтезированной структуры из двух интерференционных зеркал для канала обнаружения наличия частиц Fe в факеле двигателя

Fig. 6. Reflection spectra of the synthesized structure of two interference mirrors for the channel for detecting the presence of Fe particles in the engine flare

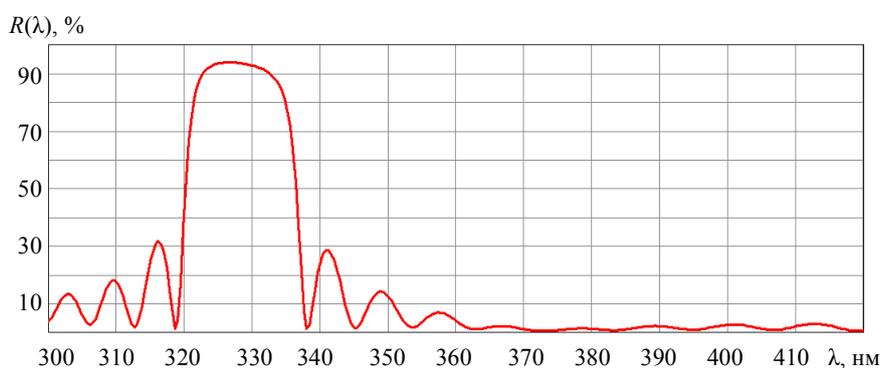


Рис. 7. Спектр коэффициента отражения синтезированной структуры из двух интерференционных зеркал для канала обнаружения наличия частиц Cu в факеле двигателя

Fig. 7. Reflection spectra of the synthesized structure of two interference mirrors for the channel for detecting the presence of Cu particles in the engine flare

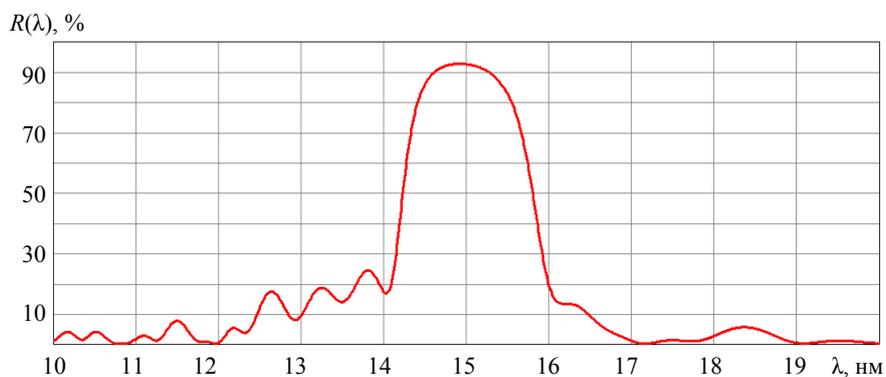


Рис. 8. Спектр коэффициента отражения синтезированной структуры из двух интерференционных зеркал для канала обнаружения наличия частиц CO₂ в факеле двигателя

Fig. 8. Reflection spectra of the synthesized structure of two interference mirrors for the channel for detecting the presence of CO₂ particles in the engine flare

Второй подход к реализации многоспектрального датчика более универсален, так как дополнительно позволяет улучшить частотную избирательность отдельных каналов обнаружения в пламени факела различных продуктов эмиссии и тем самым осуществить предварительную дефектоскопию.

Синтезируемые объективы должны отличаться узким полем зрения, так как они не только располагаются нормально к оси симметрии сопла на достаточно большом расстоянии, порядка 5...7 м, но и должны анализировать относительно небольшую область пространства, охватывающую часть области факела двигателя. В данном случае объективы

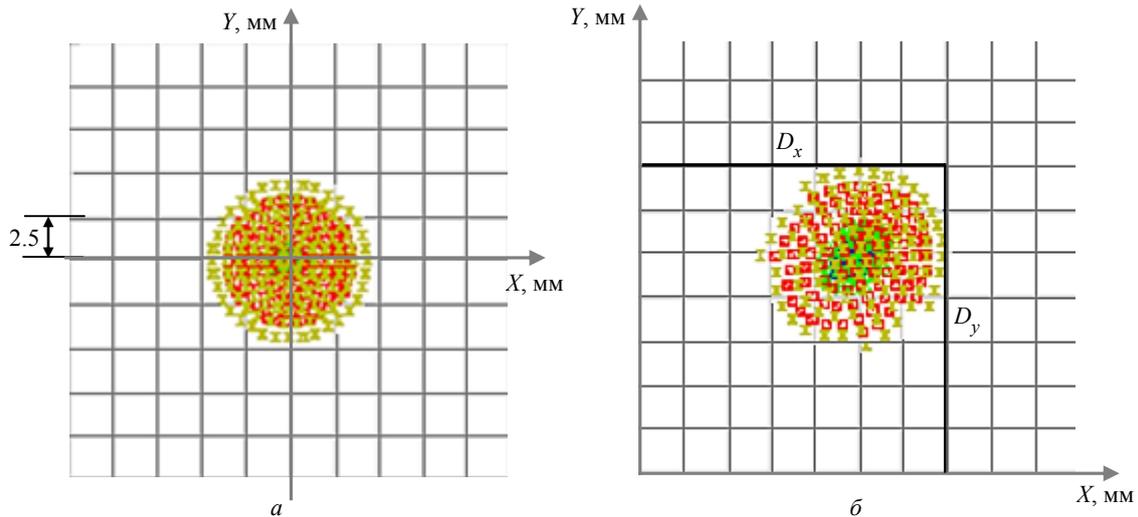


Рис. 9. Диаграмма пятен рассеяния (*a* – без отклонения от оптической оси; *б* – с максимальным отклонением; D_x, D_y – смещения от точки фокусировки в горизонтальной и вертикальной фокальной плоскости)

Fig. 9. Scattering spot diagram (*a* – without deviation from the optical axis; *b* – with maximum deviation; D_x, D_y – the distances from the focus point in the horizontal and vertical focal planes)

синтезировались так, чтобы угол зрения составил 1.4° , а на расстоянии 5 м охватывалась область факела с диаметром порядка 5...6 см.

Конструкция для реализации объектива, который служит коллиматорной системой, представлена в [13]. Она состоит из расположенных по ходу лучей двояковыпуклой линзы и отрицательного мениска, обращенного выпуклостью к изображению. Результаты синтеза объективов для ультрафиолетовой и инфракрасной областей спектра позволяют оценить необходимые размеры интерференционных зеркал по размерам ожидаемых диаграмм рассеяния пятен и их смещениям при получении изображений с максимальных углов зоны обзора. Так, на рис. 9, *a* и *б* показаны диаграммы рассеяния пятен, полученные в программе Zeemax, для направления прихода излучения по центральной оптической оси (рис. 9, *a*) и при угловом отклонении от оптической оси, получаемых смещением на 1.4 в вертикальной и в горизонтальной плоскостях (рис. 9, *б*).

При этом требуемый диаметр зеркал, наклоненных под углом 45° , можно вычислить по соотношению $D = 2 \cdot 1.41 \cdot D_x (D_x = D_y)$. Для каналов УФ-диапазона достаточно зеркала диаметром не более 6 см, а для ИК-диапазона – не более 9.5 см.

При разработке коллиматорной системы было учтено, что оптические стекла, которые были выбраны в [13], не позволяют принимать излучение в длинноволновой ИК-области, где можно обнаруживать наличие высокой концентрации CO_2 . Из подходящих оптических материалов, которые обес-

печивают работу в требуемом диапазоне длин волн, для разработки двухлинзового объектива для ИК-области были выбраны KBr и CaCl [10].

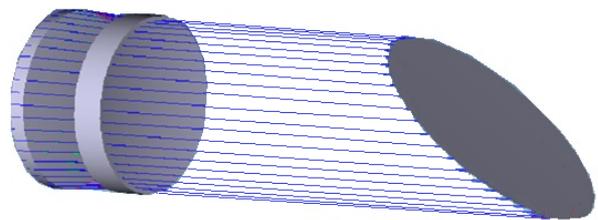


Рис. 10. Диаграмма пятен рассеяния
Fig. 10. Scattering spot diagram

Смоделированный ход лучей в объективе и перед падением на наклонное зеркало представлен на рис. 10. Он демонстрирует параллельность лучей, необходимую для реализации зеркальной системы, формирующей ход лучей до попадания их на фотоприемник.

Заключение. Известно, что для диагностики и контроля работы и экологичности авиационных газотурбинных двигателей целесообразно применение оптико-электронных систем и анализа как изображений, так и спектрального состава излучения факела. Предложены два оригинальных варианта исполнения оптической части, реализующей многоканальный прием излучения, в многоспектральном датчике контроля излучения авиационных двигателей. Выбраны диапазоны частот для анализа в ультрафиолетовой части оптического спектра излучения для обнаружения продуктов эмиссии частиц (Fe и Cu), возникающих при разрушении конструктивных материалов, а также длина волны, на

которой косвенным образом анализируется количество выбрасываемого газа (CO₂).

Синтезированы шесть различных интерференционных зеркал для трех двухзеркальных систем, служащих для частотного разделения каналов. Получены их итоговые спектральные характеристики.

Предложено и смоделировано два объектива для приема оптического излучения в инфракрасной и ультрафиолетовой области спектра.

Предложенные в статье оптические схемы и варианты синтеза зеркал могут быть использованы при построении многоспектральных датчиков оптического излучения различного назначения.

Список литературы

1. Оптико-электронный спектрометрический комплекс для контроля процессов горения в камере сгорания газотурбинного двигателя / И. Т. Губайдуллин, Т. П. Андреева, А. Р. Гумеров, А. Н. Саженов // Вестн. ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2015. № 2(41). С. 59–71.
2. Piegari A., Flory F. Optical thin films and coatings. Cambridge, UK: Woodhead Publishing, 2018. 860 p.
3. Травников Р. И., Попов Н. А. Метод и аппаратура оптической диагностики факела ракетного двигателя при стендовых испытаниях // Тр. МАИ. 2012. № 51. С. 1–17.
4. Абдуллин А. М. Анализ спектра излучения продуктов сгорания газообразного топлива // Вест. КазТУ. 2013. № 12 (16). С. 67–70.
5. Выбор диагностических параметров для обнаружения неисправности по излучению факела ракетного двигателя / А. А. Левихин, А. И. Мустейкис, С. В. Колосенок, А. С. Колосенок // Аэрокосмическая техника и технологии. 2023. № 4. С. 67–81.
6. Novikova Yu. A., Ryzhikov M. B., Tereshchenko G. V. The optical sensor for detecting NO₂ and O₃ using a white GaN LED // IOP Conf. Series: Mater. Science and Engin. III Intern. Conf. MIST: Aerospace 2020. Krasnoyarsk, Russia: IOP Publishing Ltd, 2021. Vol. 1047. P. 1–8. doi: 10.1088/1757-899X/1047/1/012065.
7. Котликов Е. Н., Новикова Ю. А., Коваленко И. И. Программа синтеза и анализа интерференционных покрытий Film Manager // Информационно-управляющие системы. 2015. № 3 (76). С. 51–59.
8. Крылова Т. Н. Интерференционные покрытия. Л.: Машиностроение, 1973. 224 с.
9. Губанова Л. А., Талдыкина Ж. Н. Исследование свойств пленкообразующих материалов для ультрафиолетовой области спектра // Науч.-техн. вестн. информационных технологий, механики и оптики. 2004. № 16. С. 208–212.
10. Зверев В. А., Кривоустова Е. В., Точилина Т. В. Оптические материалы. СПб.: Лань, 2022. 400 с.
11. Фотоприемные устройства телевизионных и оптико-электронных систем для экологического мониторинга / О. В. Алымов, Г. В. Левко, Ю. Г. Чукавина, В. Л. Чулков // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2011. № 9(122). С. 161–168.
12. Low-frequency noise spectroscopy characterization of HgCdTe infrared detectors / L. Zhu, J. Huang, Z. Xie, Z. Deng, L. Chen, Ch. Lin, B. Chen // IEEE Transactions on Electron Devices. 2020. Vol. 67, № 2. P. 547–551. doi: 10.1109/TEDE.2019.2960281.
13. Пат. № 2384868 С1 РФ. Двухлинзовый объектив / С. И. Щеглов, С. Н. Зубок. Заявл. 30.10.2008; опубл. 20.03.2010; заявитель ОАО «Красногорский завод им. С. А. Зверева». 5 с. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2384868C1_20100320.pdf (дата обращения: 09.11.2024).

Информация об авторах

Новикова Юлиана Александровна – канд. физ.-мат. наук, доцент Института фундаментальной подготовки и и технологических инноваций, СПбГУАП, ул. Б. Морская, д. 67, Санкт-Петербург, 190000, Россия.

E-mail: nov-jliana@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0003-2043-188X>

Рыжиков Максим Борисович – канд. техн. наук, доцент Института радиотехники и инфокоммуникационных технологий, СПбГУАП, ул. Б. Морская, д. 67, Санкт-Петербург, 190000, Россия.

E-mail: maxrmb@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0003-3588-9658>

References

1. Optiko-elektronnyj spektrometricheskij kompleks dlja kontrolja processov gorenija v kamere sgoranija gazoturbinnogo dvigatelja / I. T. Gubajduллин, T. P. Andreeva, A. R. Gumerov, A. N. Sazhenkov // Vestn. PNIPIU. Ajero-kosmicheskaja tehnika. 2015. № 2(41). S. 59–71. (In Russ.).
2. Piegari A., Flory F. Optical thin films and coatings. Cambridge, UK: Woodhead Publishing, 2018. 860 p.
3. Travnikov R. I., Popov N. A. Metod i apparatura opticheskoj diagnostiki fakela raketnogo dvigatelja pri stendovyh ispytaniyah // Tr. MAI. 2012. № 51. S. 1–17. (In Russ.).

4. Abdullin A. M. Analiz spektra izluchenija produktov sgoranija gazoobraznogo topliva // Vestn. KazTU. 2013. № 12 (16). S. 67–70. (In Russ.).
5. Vybór diagnosticheskikh parametrov dlja obnaruženija neispravnosti po izlucheniju fakela raketnogo dvigatelja / A. A. Levihin, A. I. Mustejkis, S. V. Kolosenok, A. S. Kolosenok // Ajerokosmicheskaja tehnika i tehnologij. 2023. № 4. S. 67–81. (In Russ.).
6. Novikova Yu. A., Ryzhikov M. B., Tereshchenko G. V. The optical sensor for detecting NO₂ and O₃ using a white GaN LED // IOP Conf. Series: Mater. Science and Engin. III Intern. Conf. MIST: Aerospace 2020. Krasnoyarsk, Russia: IOP Publishing Ltd, 2021. Vol. 1047. P. 1–8. doi: 10.1088/1757-899X/1047/1/012065.
7. Kotlikov E. N., Novikova Ju. A., Kovalenko I. I. Programma sinteza i analiza interferencionnyh pokrytij Film Manager // Informacionno-upravljajushhie sistemy. 2015. № 3 (76). S. 51–59. (In Russ.).
8. Krylova T. N. Interferencionnye pokrytija. L.: Mashinostroenie, 1973. 224 s. (In Russ.).
9. Gubanova L. A., Taldykina Zh. N. Issledovanie svojstv plenkoobrazujushchih materialov dlja ul'trafioletovoj oblasti spektra // Nauch.-tehn. vestn. informacionnyh tehnologij, mehaniki i optiki. 2004. № 16. S. 208–212. (In Russ.).
10. Zverev V. A., Krivopustova E. V., Tochilina T. V. Opticheskie materialy. SPb.: Lan', 2022. 400 s. (In Russ.).
11. Fotopriemnye ustrojstva televizionnyh i optiko-elektronnyh sistem dlja jekologicheskogo monitoringa / O. V. Alymov, G. V. Levko, Ju. G. Chukavina, V. L. Chulkov // Izv. JuFU. Tehnicheskie nauki. 2011. № 9(122). S. 161–168. (In Russ.).
12. Low-frequency noise spectroscopy characterization of HgCdTe infrared detectors / L. Zhu, J. Huang, Z. Xie, Z. Deng, L. Chen, Ch. Lin, B. Chen // IEEE Transactions on Electron Devices. 2020. Vol. 67, № 2. P. 547–551. doi: 10.1109/TED.2019.2960281.
13. Pat. № 2384868 C1 RF. Dvuhlinzovyj ob#ektiv / S. I. Shheglov, S. N. Zubok. Zajavl. 30.10.2008; opubl. 20.03.2010; zajavitel' OAO «Krasnogorskij zavod im. S. A. Zvereva». 5 s. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2384868C1_20100320.pdf (data obrashhenija: 09.11.2024). (In Russ.).

Information about the authors

Yuliana A. Novikova – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor at the Institute of Fundamental Training and Technological Innovations, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, B. Morskaya St., 67, St. Petersburg, 190000, Russia.

E-mail: nov-jliana@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0003-2043-188X>

Maksim B. Ryzhikov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor at the Institute of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, B. Morskaya St., 67, St. Petersburg, 190000, Russia.

E-mail: maxrmb@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0003-3588-9658>

Статья поступила в редакцию 19.11.2024; принята к публикации после рецензирования 23.01.2025; опубликована онлайн 28.03.2025.

Submitted 19.11.2024; accepted 23.01.2025; published online 28.03.2025.