

УДК 543.423; 543.08; 629.7.035; 621.43

ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОЛЕКУЛЯРНЫХ ПОЛОС В СПЕКТРАХ ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ ВНУТРИ МАЛОЭМИССИОННОЙ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ

© В. А. Лабусов^{1,2,3}, И. А. Зарубин¹, О. В. Пелипасов¹,
М. С. Саушкин¹, А. М. Сипатов⁴, А. Н. Саженов⁴,
В. В. Цатиашвили⁴

¹Институт автоматики и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1

²Новосибирский государственный технический университет,
630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20

³ООО «ВМК-Оптоэлектроника»,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1

⁴АО «ОДК-Авиадвигатель»,
614990, г. Пермь, ГСП, Комсомольский просп., 93, к. 61
E-mail: labusov@vmk.ru

В спектрах излучения плазмы внутри малоэмиссионной камеры сгорания газотурбинного двигателя идентифицированы молекулярные полосы (в скобках приведены наиболее интенсивные канты): ОН (306,1 нм), СН (430,18 нм), Н₂О (714–980 нм), С₂ (515,55 нм), NH (336 нм), NO (358,26 нм). Это открывает возможность использования соотношения их интенсивностей для управления рабочими параметрами камеры сгорания в целях снижения выбросов вредных веществ, регламентированных нормами ИКАО. Спектры регистрировались с помощью спектрометров «Колибри-2» в двух исполнениях: I — рабочий спектральный диапазон 190–1100 нм (разрешение 1 нм) и II — 190–360 нм (разрешение 0,2 нм). Ввод излучения в спектрометр осуществлялся с помощью волоконно-оптического кабеля и коллиматора.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, камера сгорания, эмиссия, спектрометр, спектры излучения, молекулярные полосы.

DOI: 10.15372/AUT20200402

Введение. Для выполнения текущих и перспективных норм Международной организации гражданской авиации (ИКАО) на эмиссию (выбросы) вредных веществ, обеспечение экологичности отечественной газотурбинной техники, используемой в качестве силовых установок реактивных самолётов и газотурбинных установок для перекачки газа и электрогенерации, необходимо внедрение малоэмиссионных камер сгорания (МЭКС).

Используемые в настоящее время методы проектирования МЭКС основаны на математическом моделировании физико-химических процессов смешения и горения. При этом для количественной оценки концентрации вредных выбросов NO, NO₂, CO, C_xH_y, сажи применяются пробоотборные методы и газоанализаторы, которые только косвенно диагностируют процессы горения, так как размещаются на выходе камеры сгорания. Но такая методика контроля эмиссии не позволяет выявить непосредственную связь измеренных концентраций вредных выбросов с внутрикамерными процессами, что существенно осложняет верификацию математических моделей горения и создание МЭКС. Для преодоления сложившихся методологических ограничений необходим быстродействующий оптико-электронный контроль температуры и молекулярного состава плазмы внутри камеры сгорания газотурбинного двигателя [1, 2]. Очевидно, что измерение концентрации вредных

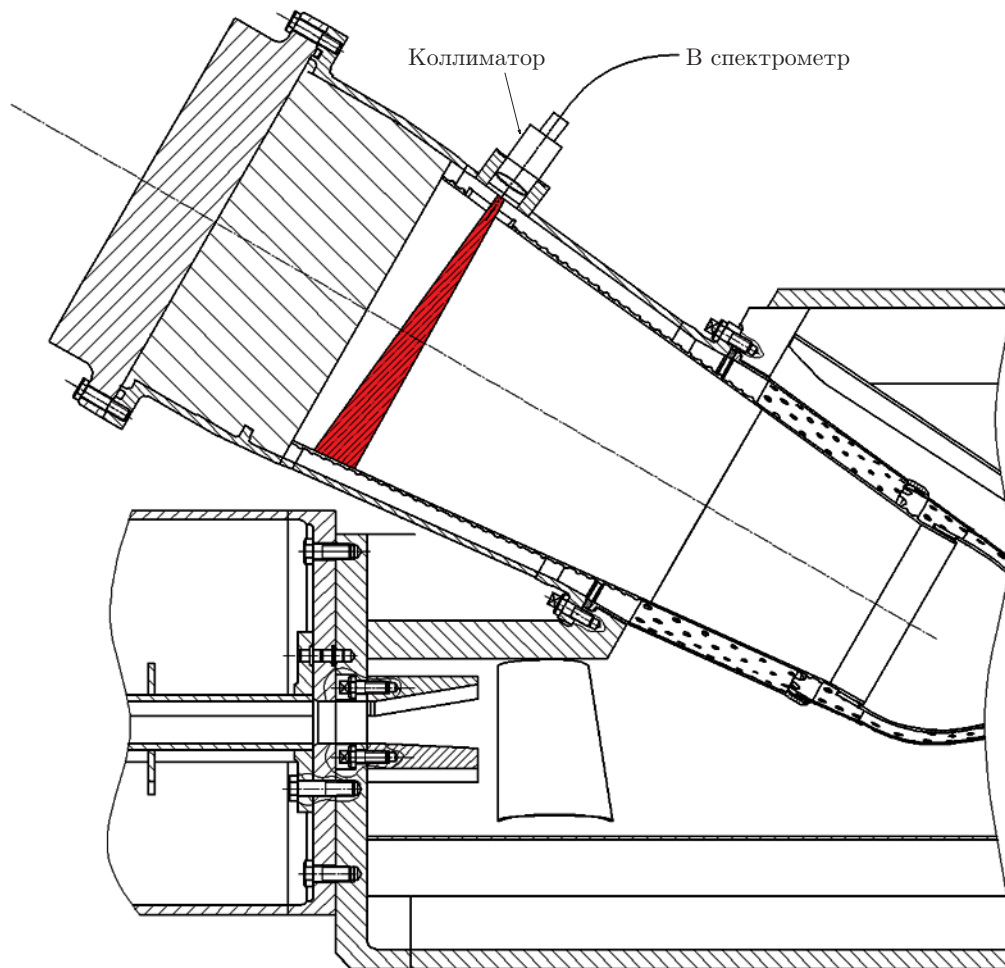


Рис. 1. Схема жаровой трубы МЭКС с выводом излучения плазмы в спектрометр. Красным цветом выделена область, излучение из которой регистрируется спектрометром

выбросов было бы полезно не только на испытательном стенде, но и в процессе эксплуатации турбомашин различного назначения и даже для автоматического управления внутрикамерными процессами МЭКС.

В настоящее время в области оптической спектрометрии плазмы используются малогабаритные спектрометры [3–5], регистрация спектра в которых осуществляется одной линейкой фотодетекторов. Одним из типов таких спектрометров является отечественный спектрометр «Колибри-2» [6], который уже зарекомендовал себя при исследовании плазмы [4]. Такой спектрометр по своим основным метрологическим характеристикам способен регистрировать спектры излучения плазмы МЭКС в реальном времени. Вывод излучения из МЭКС возможен с помощью волоконно-оптического кабеля.

Цель работы — идентификация молекулярных полос газов, регламентируемых нормами ИКАО: оксидов азота NO_x и углерода CO , а также несгоревших углеводородов C_xH_y и других молекул в спектрах излучения плазмы внутри жаровой трубы МЭКС газотурбинного двигателя с использованием спектрометра «Колибри-2».

Экспериментальная установка. Объектом испытания являлась жаровая труба многомодульной МЭКС наземного газотурбинного двигателя мощностью 25 МВт, разработанная АО «ОДК-Авиадвигатель» (г. Пермь). Её схема показана на рис. 1. Конструкция

жаровой трубы описана в [7]. Сжигание топливоздушнной смеси организовано по Lean Premixed (LP). Испытания жаровой трубы осуществляли в составе одnogорелочного отсека, который служит для проведения стендовых испытаний сектора 1/12 МЭКС в условиях, близких к реальным газодинамическим. В качестве топлива в камере сгорания используется природный газ с объёмным содержанием метана CH_4 97–98 % по ГОСТ 5542-2014, а в качестве окислителя — атмосферный воздух. На выходе из одnogорелочного отсека установлен выходной мерный участок для размещения приёмников проб газа для измерения эмиссии вредных выбросов на выходе из МЭКС.

Излучение плазмы внутри МЭКС выводилось через отверстие, предназначенное для установки датчика пульсаций давления, вместо которого был размещён коллиматор ($\varnothing = 5$ мм, $F = 10$ мм), собирающий излучение плазмы в кварцевый световод диаметром 1 мм и числовой апертурой 0,22 волоконно-оптического кабеля длиной 2 м (см. рис. 1). Пропускание световода составляло более 80 % в диапазоне 200–1100 нм. Окно устройства сопряжения камеры сгорания с коллиматором выполнено из сапфира для защиты коллиматорной линзы от воздействия плазмы.

Спектры излучения плазмы внутри камеры сгорания регистрировались с помощью спектрометров «Колибри-2» с линейками фотодетекторов БЛПП-2000 в двух исполнениях: I — рабочий спектральный диапазон 190–1100 нм (спектральное разрешение 1 нм) и II — 190–360 нм (спектральное разрешение 0,2 нм).

Область камеры сгорания, из которой излучение плазмы МЭКС попадает в световод и соответственно вносит вклад в зарегистрированный спектр, имеет форму усечённого конуса с диаметрами оснований 1,5 и 17 мм. Продольное сечение конуса показано красным цветом. Такая оптическая система вывода излучения из камеры сгорания не обеспечивает пространственную детализацию полученного спектра излучения вдоль оптической оси, каждая координата которой вносит в него приблизительно равный вклад. Однако поперёк оптической оси, в принципе, возможно получение локальности области регистрации на уровне нескольких миллиметров, что может оказаться приемлемым для решения ряда практических задач.

Спектры излучения регистрировались в относительных единицах (в процентах от полной шкалы) при базовом времени экспозиции 10 мс, количестве накоплений 1000. При этом полное время регистрации одного спектра составляло 10 с. При отсутствии излучения (неработающая МЭКС) среднее квадратическое отклонение (СКО) выходного сигнала равно 0,0043 %. Регистрация и обработка спектров проводилась под управлением программного обеспечения (ПО) «Атом» [8].

Идентификация молекулярных полос и атомарных линий в спектрах излучения. Обзорные спектры излучения плазмы МЭКС представлены на рис. 2. При рассмотрении полученных спектров можно отчётливо видеть как отдельные линии, принадлежащие атомам Na и K (рис. 2, а), так и электронно-колебательно-вращательные молекулярные полосы различных молекул и радикалов. Модельные спектры молекул плазмы, полученные с помощью программ моделирования спектров излучения низкотемпературной плазмы Libbase [9], SpecAir [10], Spartan [11], баз данных Hitran [12] и The MPI-Mainz UV/VIS Spectral Atlas of Gaseous Molecules of Atmospheric Interest [13], были внесены в базу данных спектральных линий ПО «Атом». Идентификация (отождествление) молекулярных полос в атомно-эмиссионных спектрах осуществлялась визуальным сравнением спектров молекул из базы данных спектральных линий с зарегистрированными спектрами излучения плазмы МЭКС. После совпадения спектров по длинам волн и по внешнему виду (оттенение, вид полосы) молекулярная полоса считалась идентифицированной.

Используя компьютерную программу моделирования термохимических процессов, протекающих в ракетных двигателях NASA «CEA» (Chemical Equilibrium with

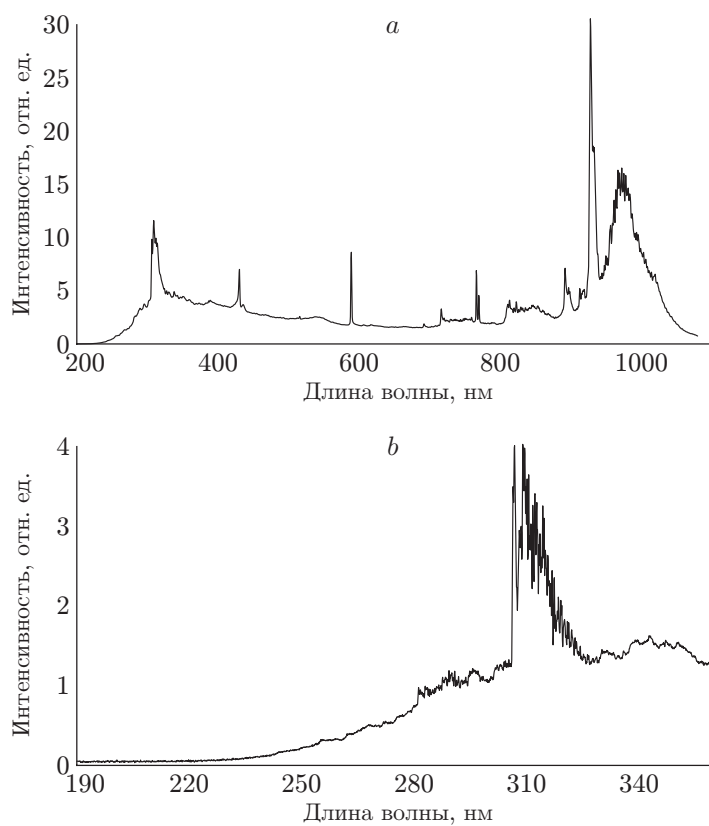


Рис. 2. Обзорные спектры плазмы МЭКС, зарегистрированные спектрометрами «Колибри-2»: исполнения I (а) и II (b)

Applications), можно получить предварительный состав плазмы, образованный окислением метана воздухом [14]. Основными продуктами реакции окисления метана являются двуокись углерода (CO_2) и вода (H_2O), которые под действием высокой температуры могут диссоциировать и образовывать двухатомные молекулы и радикалы: C_2 , CO , OH , CH . Поскольку в качестве окислителя используется атмосферный воздух, в спектрах возможно появление полос азотосодержащих молекул, таких как NH , N_2 , NO , CN и др. [15].

Идентификация молекул, полосы которых лежат в области 190–360 нм, проводилась по спектрам, зарегистрированным спектрометром II.

ОН. Наиболее отчётливо отделяемой от шума молекулярной полосой в ультрафиолетовой области спектра является полоса свободного радикала OH (А-Х), для которой характерно красное оттенение с ярко выраженными кантами. На рис. 3, а приведён фрагмент двух колебательных переходов этой полосы в области 280–325 нм с неразрешённой вращательной структурой.

СН. Известно три системы молекулярных полос в областях 430, 390 и 314,3 нм. В области 430 нм (рис. 3, b) отчётливо видна полоса молекулы CH , которая легко возбуждается при сжигании углеводородов. Полоса имеет интенсивный широкий кант Q -ветви с фиолетовым оттенением и R -ветвь с широко расставленной структурой, которая приобретает красное оттенение. В области 390 нм проявляется ещё одна полоса системы (рис. 3, c), которая имеет очень широко расставленную структуру с красным оттенением. Q -кант довольно широкий, тогда как R -кант резкий и похож на спектральную линию атома. Полоса 314,3 нм появляется при высокой температуре и в полученных спектрах отчётливо не выявлена.

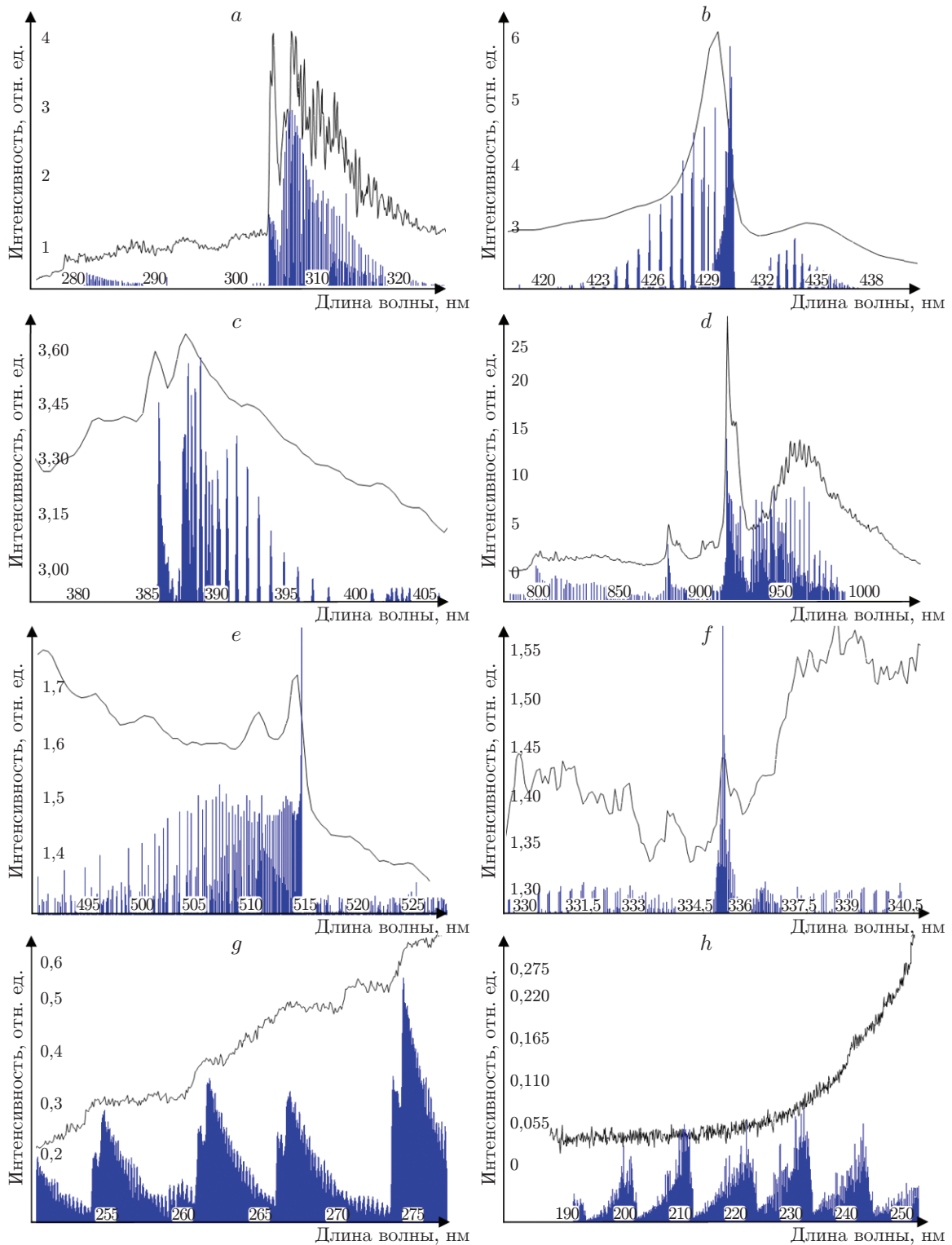


Рис. 3. Участки спектра плазмы МЭКС с молекулярными полосами и спектральные линии базы данных ПО «Атом» (синего цвета): OH (a), CH (b, c), H₂O (d), C₂ (e), NH (f), NO (g, h)

H₂O. В длинноволновой области спектра 700–1100 нм простираются полосы излучения молекулы H₂O (рис. 3, *d*). Согласно справочнику Пирса [16] спектр испускания молекулы H₂O представляет собой очень сложную структуру: полосы похожи на вращательно-колебательный спектр поглощения этой молекулы. Моделирование спектров поглощения воды в областях ближнего ИК-диапазона позволило найти и внести в базу данных ПО «Атом» очень похожий по структуре спектр.

C₂. У этой молекулы имеются три интенсивные системы полос: система Свана, Фаулера и Деландра. При детальном рассмотрении полученных спектров в области 470–520 нм (рис. 3, *e*) можно наблюдать полосы молекулы C₂ системы Свана. Полосы Свана появляются всегда при сжигании углеводородов, имеют фиолетовое оттенение и хорошо различимые серии. Системы Фаулера и Деландра в спектрах не наблюдаются, поскольку возбуждаются только при высоком давлении и искровом возбуждении соответственно.

NH. Имеются четыре системы полос NH. Наиболее легко возбуждается триплетная система в области 336,0 нм (рис. 3, *f*), полосы которой едва заметно оттенены в обоих направлениях, так что ветви образуют интенсивный центральный максимум, а *R*- и *P*-ветви симметрично расходятся.

NO. В эмиссии могут наблюдаться три системы полос окиси азота NO, известные под названиями β , γ и δ . Наиболее вероятно в спектре обнаружить полосы β -, γ -систем, поскольку δ -система появляется только в активном азоте или чаще в поглощении. Полосы β -системы расположены в области от 230 до 550 нм и имеют красное оттенение с двойными кантами. Структура полос очень развитая, в результате чего очень сложно найти начала полос и их канты. Полосы γ -системы легко проявляются в спектрах пламени, содержащего окись азота. Система расположена в области от 160 до 350 нм, имеет фиолетовое оттенение со сдвоенными полосами и двойными кантами. Значимой корреляции молекулярных полос NO из базы данных и зарегистрированного спектра плазмы МЭКС не наблюдается (рис. 3, *g*, *h*).

CO. Для молекулы CO известно больше систем полос, чем для любой другой. Наиболее часто наблюдаются полосы Ангстрема в видимой области спектра, третья положительная в ближней ультрафиолетовой области, а четвёртая положительная в области дальнего ультрафиолета вплоть до 160 нм. Идентификация полос CO в полученных спектрах излучения плазмы МЭКС вызывает сомнение. Поиск следов молекулярной полосы CO в зарегистрированных спектрах проводился по системам полос: 4+, Ангстрема, 3+, Асунди, триплетная, Герцберга, Камерона, Каплана. В области 450–480 нм имеются неидентифицированные полосы, которые можно отнести к началам полос CO системы Ангстрема, однако полученное отношение сигнал/шум (менее 5) не позволяет надёжно отождествить их с предполагаемыми полосами.

NO₂. Значимой корреляции молекулярных полос NO₂ из базы данных и зарегистрированного спектра излучения плазмы МЭКС не наблюдается. Согласно [16] спектр NO₂ наблюдается практически полностью в поглощении. Он крайне сложен и весьма развит. Обычно спектр NO₂ делят на две системы: видимую в области 400–500 нм и ультрафиолетовую в области 235–250 нм.

CO₂. Нейтральной молекуле принадлежат две развитые системы полос. Наиболее вероятно обнаружить систему пламени окиси углерода в области 300–500 нм с максимумом интенсивности около 420 нм. Спектр этой системы представляет собой множество узких полос без явного оттенения. Как и спектр молекулы NO₂, спектр CO₂ в спектрах испускания плазмы МЭКС обнаружен не был.

Спектр испускания плазмы МЭКС, зарегистрированный спектрометром «Колибри-2», содержит множество спектральных наложений как от надёжно идентифицированных полос двухатомных молекул, так и от неотожествлённых. Для уточнения положения некоторых молекулярных полос было решено провести измерение спектра испускания пламени

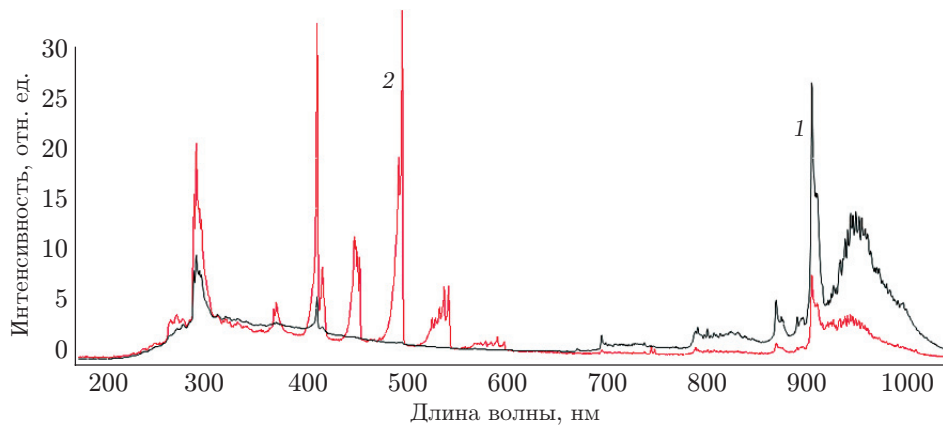


Рис. 4. Зарегистрированные спектры плазмы МЭКС (1) и газовой горелки (2) с пропан-бутановой смесью

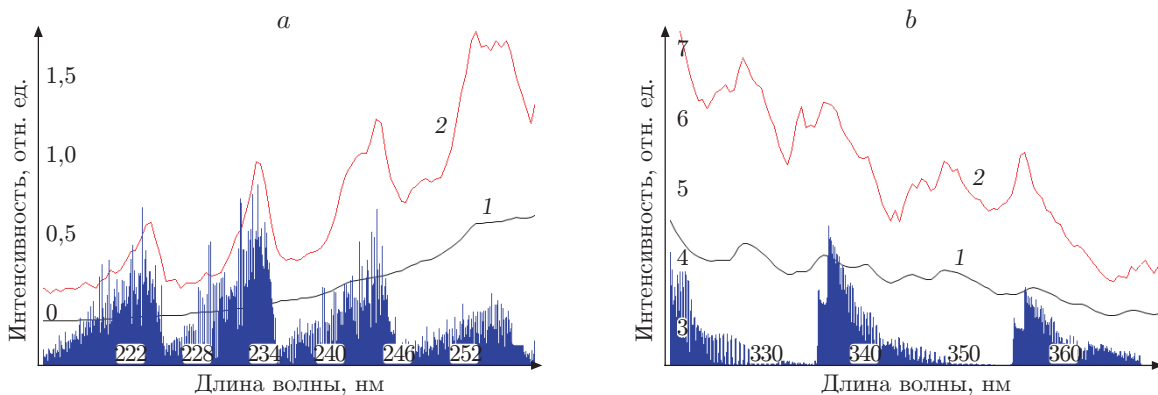


Рис. 5. Фрагменты спектров излучения γ -системы полос молекулы NO плазмы МЭКС (1) и газовой горелки (2): пропан-бутановая смесь с добавлением раствора аммиака (а), β -система (b)

газовой горелки с пропан-бутановой смесью, куда дополнительно вносился раствор нашатырного спирта $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$. На рис. 4 представлены спектры испускания пламени газовой горелки (базовое время экспозиции 300 мс) и плазмы МЭКС. Для спектра пламени газовой горелки характерны более интенсивные полосы C_2 и CH . Введение раствора аммиака $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ в пламя вызывает усиление интенсивности полос NO как для β -системы, так и для γ , что облегчает их идентификацию (рис. 5). Наложение молекулярных полос OH, CH, NH на полосы NO возможно в диапазоне 280–345 нм.

Сравнение спектров, зарегистрированных в камере сгорания, со спектром газовой горелки с добавлением $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ и учёт спектральных наложений соседних полос показывает, что для определения молекулы NO подходят два участка спектра в области 220–246 и 335–360 нм.

Заключение. Качество полученных спектров излучения плазмы малоэмиссионной камеры сгорания достаточно для надёжной идентификации молекулярных полос (в скобках приведены наиболее интенсивные канты): OH (306,1 нм), CH (430,18 нм), H_2O (область 714–980 нм), C_2 (515,55 нм), NH (336 нм), NO (358,26 нм). Это открывает возможность использования соотношения их интенсивностей для управления рабочими параметрами камеры сгорания в целях снижения выбросов вредных веществ.

Система вывода излучения из камеры сгорания в спектрометр с помощью волоконно-

оптического кабеля с коллиматором может быть использована не только на экспериментальном стенде, но и в процессе эксплуатации. Локализация области регистрации спектра перпендикулярно оптической оси на уровне нескольких миллиметров позволит определить пространственное распределение излучения молекулярных полос и получить дополнительную информацию о химических реакциях, протекающих в камере сгорания. Однако для этого необходимо иметь несколько идентичных систем вывода излучения, собирающих его из разных областей камеры сгорания.

Для надёжной идентификации полос CO необходимо повысить разрешающую способность спектрометра в области 400–480 нм. Возможно, этого будет достаточно и для идентификации молекул CO₂ и NO₂.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **More Intelligent Gas Turbine Engines.** RTO Technical Report TR-AVT-128/RTO NATO. France, 2009. 178 p.
2. **Иноземцев А. А., Саженов А. Н., Цатиашвили В. В. и др.** Разработка и применение бесконтактной технологии исследования процессов горения в камере сгорания газотурбинного двигателя // Теплофизика и аэромеханика. 2015. **22**, № 3. С. 373–384.
3. **Kubota Y., Ichiki R., Hara T. et al.** Spectroscopic analysis of nitrogen atmospheric plasma jet // Journ. Plasma Fusion Res. 2009. **8**. P. 740–743.
4. **Борзов С. М., Козик В. И., Лабусов В. А., Шараборин Д. К.** Использование спектрометра «Колибри-2» для исследования излучения пламени // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. **83**, № 7. С. 13–18.
5. **Губайдуллин И. Т., Андреева Т. П., Гумеров А. Р., Саженов А. Н.** Оптико-электронный спектрометрический комплекс для контроля процессов горения в камере сгорания газотурбинного двигателя // Вестн. ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2015. № 41. С. 59–71.
6. **Зарубин И. А., Лабусов В. А., Бабин С. А.** Характеристики малогабаритных спектрометров с дифракционными решётками разных типов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. **85**, № 1-2. С. 117–121.
7. **Пат. 2633982 РФ.** Жаровая труба камеры сгорания газотурбинного двигателя /А. М. Сипатов, И. У. Фагалов, Г. Н. Семаков, В. А. Назукин, Н. А. Андрюков, В. В. Цатиашвили, Т. В. Абрамчук. Заявл. 29.06.2016; Оpubл. 20.10.2017, Бюл. № 29.
8. **Гаранин В. Г., Неклюдов О. А., Петроченко Д. В. и др.** Программное обеспечение атомного спектрального анализа «Атом» // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. **85**, № 1-2. С. 103–111.
9. **Luque J., Crosley D. R.** SRI International. LIFBASE Software Spectroscopy Tool // SRI International MP 99-009. 1999. P. 21.
10. **Laux C. O.** Spec AIR code. 2019. URL: <http://www.specair-radiation.net/> (дата обращения: 09.01.2019).
11. **The line-by-line radiative code SPARTAN.** 2019. URL: <http://esther.ist.utl.pt/spartan/> (дата обращения: 09.01.2019).
12. **The HITRAN Database.** Harvard-Smithsonian center for astrophysics. Electronic data. Harvard: CfA, 2020. URL: <http://www.cfa.harvard.edu/hitran> (дата обращения: 07.03.2020).
13. **Keller-Rudek H., Moortgat G. K., Sander R., Sørensen R.** The MPI-Mainz UV/VIS spectral atlas of gaseous molecules of atmospheric interest // Earth Syst. Sci. Data. 2013. **5**. P. 365–373. DOI: 10.5194/essd-5-365-2013.

14. **Gordon S., McBride B. J.** NASA Chemical Equilibrium with Applications (CEA). 2019. URL: <http://www.grc.nasa.gov/WWW/CEAWeb/> (дата обращения: 12.11.2018).
15. **Molnar M., Marek C.** New reduced two-time step method for calculating combustion and emission rates of jet-a and methane fuel with and without water injection. 2020. URL: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20040070781.pdf> (дата обращения: 04.06.2020).
16. **Пирс Р., Гейдон А.** Отождествление молекулярных спектров. М.: Изд-во иностр. лит., 1949. 248 с.

Поступила в редакцию 04.06.2020

После доработки 23.06.2020

Принята к публикации 29.06.2020
