

**ЖУРНАЛ
ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
АВИАЦИОННАЯ ТЕХНИКА**

В журнале публикуются результаты фундаментальных и прикладных исследований вузов, научно-исследовательских, проектных и производственных организаций в области авиационной и ракетной науки и техники по разделам:

- Авиационная техника
- Проектирование летательных аппаратов
- Строительная механика и прочность летательных аппаратов
- Динамика полета и управление летательными аппаратами
- Аэро- и газодинамика летательных аппаратов и их двигателей
- Проектирование и доводка авиационных и ракетных двигателей
- Теория авиационных и ракетных двигателей
- Авиационные приборы и измерительно-вычислительные комплексы
- Технология авиационного производства
- Автоматизация проектирования и производства авиационной техники
- Радиотехника и связь

Кроме научных статей в журнале публикуются обзоры, научная хроника и дискуссии, информация и другие материалы.

Периодичность журнала – 4 выпуска в год.

Подписная цена на первое полугодие 2016 г. – 400 руб.

**JOURNAL
IZVESTIYA VYSSHIKH UCHEBNYKH ZAVEDENII
AVIATIONNAYA TEKHNIKA**

In this journal we publish the results of fundamental and applied researches of higher educational establishments, research, design, and industrial organizations in the field of aircraft and rocket science and engineering in accordance with the following themes:

- Aircraft equipment
- Flight vehicle design
- Structural mechanics and strength of flight vehicles
- Flight dynamics and control of flight vehicles
- Aero- and gas-dynamics of flight vehicles and their engines
- Aircraft and rocket engine design and development
- Aircraft and rocket engine theory
- Aircraft instruments and instrumentation computer complexes
- Aircraft production technologies
- Automation of design and production of aeronautical equipment
- Radio engineering and communication

Together with the scientific articles, we publish surveys, scientific reports, and discussions, and also information and other materials.

Periodicity of the journal – 4 issues per year.

For foreign subscribers to the Russian edition of Journal, please, contact: Joint-Stock Company «МК-PERIODICA», 10, Str. 3, Elektrodnyaya St., Moscow, 111524, Russia. Fax: (495) 672-7089, phone: (495) 306-3757; E-mail: info@periodicals.ru.

For foreign subscribers to the English edition of «Russian Aeronautics»: Allerton Press, Inc., 250 West 57th Street, Suite 2001, New York, NY 10107, USA.



ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ
ЗАВЕДЕНИЙ



Авиационная техника

АВИАЦИОННАЯ ТЕХНИКА

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор

Михайлов С.А. д.т.н., проф. КНИТУ-КАИ

Зам. гл. редактора

Куршев В.Н. д.т.н., проф. КНИТУ-КАИ
Ефремов А.В. д.т.н., проф. МАИ
Щужин А.В. д.т.н., проф. КНИТУ-КАИ

Абрамович Х. проф. Израильского технол. ин-та «Технион»

Баракос Дж. PhD, проф. Ливерпульского ун-та
Мединг К. к.т.н. Munich University of Applied Sciences
Сундер Р. к.т.н., член Индийской АН, Bangalore Integrated System Solutions (P) Ltd

Чжен Гуанхуа к.т.н., доц. СЗПУ
Адгамов Р.И. д.т.н., проф. КНИТУ-КАИ
Белуосов А.И. д.т.н., проф. СГАУ
Волков А.В. д.ф.-м.н., доц. ФГУП «ЦАГИ»
Гайнутдинов В.Г. д.т.н., проф. КНИТУ-КАИ
Гортышов Ю.Ф. д.т.н., проф. КНИТУ-КАИ
Гудрамович В.С. чл.-корр. НАН Украины
Дегтярев Г.Л. д.т.н., проф. КНИТУ-КАИ
Егоров А.Г. д.ф.-м.н., проф. КФУ
Закиров И.М. д.т.н., проф. КНИТУ-КАИ
Иванов В.Л. к.т.н., доц. МГТУ
Кривошеев И.А. д.т.н., проф. УГАТУ
Мингазов Б.Г. д.т.н., проф. КНИТУ-КАИ
Мухин В.С. д.т.н., проф. УГАТУ
Павлов В.А. д.т.н., проф. КНИТУ-КАИ
Паймушин В.Н. д.ф.-м.н., проф. КНИТУ-КАИ
Панченко В.И. к.т.н., проф. КНИТУ-КАИ
Солдаткин В.М. д.т.н., проф. КНИТУ-КАИ
Тарасов Ю.Л. д.т.н., проф. СГАУ
Хартос С.А. д.т.н., проф. МАИ
Туркин И.К. д.т.н., проф. МАИ
Халиулин В.И. д.т.н., проф. КНИТУ-КАИ

Ответственный секретарь

Зиляева Е.И.

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Председатель

Гортышов Ю.Ф. Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ

Герашченко А.Н. Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

Шахматов Е.В. Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С.П. Королева (национальный исследовательский университет)

Гузаиров М.Б. Уфимский государственный авиационный технический университет

Васильев С.Н. Институт проблем управления РАН

Александров А.А. Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Сон Э.Е. Объединенный институт высоких температур РАН

Абрамович Хайм Израильский технологический институт «Технион»

Лю Чженься Северо-западный политехнический университет

Кривцов В.С. Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского (ХАИ)

Чернышев С.Л. Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского

Чернышов В.А. Научно-исследовательский институт авиационного оборудования

Михеев С.В. ОАО «Камов»

Григорьев С.Н. Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

Журнал «Известия вузов. Авиационная техника» имеет научно-технический профиль и публикует материалы, представляющие интерес для развития авиационной, ракетной и космической техники. Англоязычная версия журнала «Russian Aeronautics» выпускается издательством «Allerton Press» (США), входит в базу данных Scopus с 2005 г.

В журнале печатаются только те статьи, которые не опубликованы и не переданы в другие редакции. Публикация для всех категорий авторов бесплатна.

К статье необходимо приложить следующие документы: сопроводительное письмо на имя главного редактора; экспертное заключение о возможности опубликования в открытой печати; выписку из протокола заседания кафедры (отдела) или НТС организации с рекомендацией к опубликованию и указанием раздела журнала; сведения об авторах: фамилия, имя, отчество, ученая степень, ученое звание, должность, полное название учреждения с указанием факультета и кафедры (отдела, сектора и т.п.); e-mail и телефон для связи.

Статья представляется в двух экземплярах: на бумаге формата А4 и в виде электронного документа. Рукопись должна быть тщательно выверена и подписана всеми авторами.

В статьях должна быть использована международная система единиц измерения СИ.

На отдельном листе необходимо приложить расшифровку индексов, образованных от русских слов.

Авторы должны избегать повторения одних и тех же данных в тексте, таблицах, графиках; сокращения допускаются только общепринятые.

Цитируемая литература нумеруется в порядке упоминания, в тексте порядковый номер ссылки заключается в квадратные скобки. Нумерация и включение в список литературы всех упомянутых в статье источников обязательны. Ссылки на статьи, находящиеся в печати, не допускаются. Список литературы должен быть оформлен в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008.

После положительной рецензии должен быть осуществлен полный перевод статьи на английский язык. Использование для перевода машинных переводчиков и различных интернет-сервисов, выполняющих автоматический перевод, недопустимо.

Статья, нуждающаяся в доработке, направляется авторам с замечаниями. Доработанная статья рецензируется повторно.

Материалы, представляемые к публикации, направляются в редакционную коллегию журнала по адресу 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 10, КНИТУ-КАИ, ответственному секретарю журнала.

Авторам статей, опубликованных в англоязычной версии журнала «Russian Aeronautics», издательство «Allerton Press» (США) выплачивает гонорар через Российское авторское общество (123995, г. Москва, ГСП-5, ул. Б. Бронная, 6, а; отдел расчетов (495) 697-33-35; <http://www.rao.ru/index.php/pravoobladelatelyam/eksport-import>).

Обязательные структурные элементы статьи на русском и английском языках и их оформление: 1) УДК; 2) название статьи; 3) инициалы и фамилии авторов; 4) аннотация; 5) ключевые слова (не более 10); 6) текст статьи основной; 7) список литературы; 8) дата отправки статьи в редакцию; 9) сведения об авторах (Ф.И.О., звание, должность, организация, e-mail).

Требования к оформлению статей. Компьютерный вариант статьи оформляется в виде единого файла, включающего полный текст статьи, формулы, таблицы, рисунки, список литературы и сведения об авторах. Файл именуется по фамилии первого автора.

Файл должен быть представлен в редакторе Microsoft Word 2003. Гарнитура шрифта – Times New Roman, размер шрифта – 14 пт, интервал полуторный. Объем материала не должен превышать 8-12 с.

Таблицы и иллюстрации. На все помещаемые в статью таблицы и иллюстрации (чертежи, графики, схемы, компьютерные раскладки, диаграммы, фотоснимки, рисунки) в тексте должны присутствовать ссылки. Каждая иллюстрация и таблица должна иметь содержательное наименование и номер. Следует использовать сквозную нумерацию (арабскими цифрами) в пределах статьи отдельно для иллюстраций и таблиц. Таблицы и иллюстрации располагаются непосредственно после абзаца, в котором содержится ссылка на них.

Пропуски в столбцах при отсутствии данных заполняют тире.

Размерности числовых данных в таблицах выносят в текст головки или название таблицы.

Иллюстрации должны быть тщательно подготовлены для печати в электронном виде (сканированы или выполнены в графическом редакторе) и вставлены в текст. Сканирование должно быть выполнено с разрешением не менее 300 dpi с расширением .tif или .jpg. Допускается представление иллюстраций в формате .cdg. Иллюстрации, выполненные при помощи средств рисования MS Office, не принимаются.

Графики должны иметь полную систему указателей в подрисовочных подписях или тексте статьи. Внутрисовочные обозначения: латинские символы – шрифт Times New Roman светлый курсив, греческие символы – шрифт Symbol светлый прямой.

Оси координат и кривые должны быть изображены линиями одинаковой толщины 0,25 мм. Координатная сетка – линиями толщиной 0,18 мм. Подрисовочная подпись: размер шрифта – 9 пт, пояснение к подрисовочным подписям: размер шрифта – 8 пт.

Формулы должны быть набраны в редакторе формул MathType.

Латинские символы: шрифт Times New Roman светлый курсив.

Греческие символы – шрифт Symbol светлый прямой.

Размер символов в формулах: обычный – 14 пт; индекс – 65 % от обычного; символ – 150 % от обычного.

Формулы, на которые имеются ссылки в тексте, нумеруются и располагаются по центру строки, номер формулы должен совпадать с правым краем границы текста.

Статьи, не удовлетворяющие указанным правилам оформления, будут возвращены авторам без рассмотрения.

За справками обращаться к ответственному секретарю журнала.

Тел.: (843) 238-58-10

E-mail: at-secretary@yandex.ru

Редактор Е.М. Зиннатуллина Компьютерная верстка – А.А. Золина
Подписано в печать 25.09.16. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 15,8. Тираж 200. Заказ А56.

Адрес редакции: 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10, КНИТУ-КАИ, редакция журнала «Известия вузов. Авиационная техника».

Тел. (843) 238-58-10; факс (843) 236-60-32; www.kai.ru/aviatech/ E-mail: at-secretary@yandex.ru

Address: KNRTU-KAI, 10 Karl Marx Str., Kazan, 420111, Russia

Полиграфический участок Издательства Казанского государственного технического университета (КНИТУ-КАИ)
420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10

The journal is translated into English and published under the title Russian Aeronautics by Allerton Press, Inc., USA



СОДЕРЖАНИЕ

Авиационная техника

Неделько Д.В.

Способ определения предельно допустимых значений диагностических признаков технического состояния агрегатов трансмиссии вертолета

Строительная механика и прочность летательных аппаратов

Антуфьев Б.А.

Динамика дискретно подкрепленной цилиндрической оболочки под действием движущейся нагрузки

Горелов А.В., Николаев Е.И., Сидоров И.Н.

Расчет коэффициента запаса статической прочности по теории предельного равновесия композитной лопасти несущего винта вертолета, имеющей повреждения

Клочков Ю.В., Николаев А.П., Вахнина О.В., Киселева Т.А.

Анализ напряженно-деформированного состояния фрагмента фюзеляжа в форме тонкой оболочки с использованием треугольного конечного элемента с множителями Лагранжа

Динамика полета и управление летательными аппаратами

Афанасьев В.А., Дегтярев Г.Л., Киселёв В.И., Мещанов А.С.

Управление летательными аппаратами с регулируемым центром масс

Быков А.В., Кондрашев Г.В., Парафес С.Г., Туркин И.К.

Методы исследования характеристик электрического рулевого привода беспилотного летательного аппарата в задачах аэроупругости

Гирфанов А.М., Гирфанова Р.А.

Численное моделирование полета вертолета по заданной траектории

Кудрявцев Д.Ю., Аминев Д.А., Свиридов А.С.

Вычислительно-эффективная математическая модель полета летательных аппаратов

Храмов А.А., Ишков С.А.

Оптимизация проектно-баллистических параметров низкоорбитальных космических аппаратов с двигательными установками с накоплением энергии

Аэро- и газодинамика летательных аппаратов и их двигателей

Абзалилов Д.Ф., Марданов Р.Ф.

Расчет и оптимизация аэродинамических характеристик крылового профиля с выдувом реактивной струи при наличии в потоке вихря

Гайнутдинова Т.Ю., Гайнутдинова А.В.

Об алгоритме расчета летных характеристик легкого летательного аппарата и рациональных проектных параметров воздушного винта на стадии аванпроекта

CONTENTS

Aircraft equipment

3 *Nedel'ko D.V.*

Method of determining the maximum permissible values for diagnostic signs of helicopter transmission units operational status

Structural mechanics and strength of flight vehicles

8 *Antuf'ev B.A.*

Dynamics of a discretely reinforced cylindrical shell under live load

13 *Gorelov A.V., Nikolaev E.I., and Sidorov I.N.*

Calculation of a safety factor of damaged composite main rotor blade according to limit equilibrium theory

20 *Klochkov Yu.V., Nikolaev A.P., Vakhnina O.V., and Kiseleva T.A.*

Stress-strain analysis of a thin-shell part of fuselage using a triangular finite element with Lagrange multipliers

Flight dynamics and control of flight vehicles

27 *Afanas'ev V.A., Degtyarev G.L., Kiselev V.I., and Meshchanov A.S.*

Control of flight vehicles with the adjustable center of mass

34 *Bykov A.V., Kondrashev G.V., Parafes' S.G., and Turkin I.K.*

Methods for investigating the unmanned aerial vehicle electric actuator performance in aeroelasticity tasks

40 *Girfanov A.M. and Girfanova R.A.*

Numerical modeling of helicopter flight on a prescribed trajectory

45 *Kudryavtsev D.Yu., Aminev D.A., and Sviridov A.S.*

Computationally effective mathematical model of airplane flight

52 *Khramov A.A. and Ishkov S.A.*

Optimization of project-ballistic parameters for low earth orbit spacecraft with propulsion systems with energy storage

Aero- and gas-dynamics of flight vehicles and their engines

58 *Abzalilov D.F. and Mardanov R.F.*

Calculation and optimization of aerodynamic characteristics of airfoils with jet blowing in the presence of vortex in the flow

64 *Gainutdinova T.Yu. and Gainutdinova A.V.*

Algorithm of calculating the light airplane flight performance and rational design airscrew parameters at the preliminary design stage

- Лепешинский И.А., Истомин Е.А., Заранкевич И.А., Решетников В.А.* 71 *Lepeshinskii I.A., Istomin E.A., Zarankevich I.A., and Reshetnikov V.A.*
Смесительное устройство пузырьковой структуры открытого типа
Open-type mixing device of a bubble structure
- Попов С.А., Гуереш Дж., Кузнецов А.В.* 76 *Popov S.A., Gueraiche Djahid, and Kuznetsov A.V.*
Экспериментальное исследование аэродинамических характеристик крыла с треугольным выступом различных конфигураций
Experimental study of the aerodynamics of a wing with various configurations of wingtip triangular extension
- Сипатов А.М., Карабасов С.А., Гомзигов Л.Ю., Абрамчук Т.В., Семаков Г.Н.* 80 *Sipatov A.M., Karabasov S.A., Gomzikov L.Yu., Abramchuk T.V., and Semakov G.N.*
Моделирование распада пленки жидкости с использованием адаптивных сеточных моделей
Fluid film break-up modeling using adaptive mesh refinement models
- Проектирование и доводка авиационных и ракетных двигателей**
Aircraft and rocket engine design and development
- Белусов А.И., Пономарев Ю.К.* 87 *Belousov A.I. and Ponomarev Yu.K.*
Пространственная виброзащита турбонасосного агрегата водородного ракетного двигателя
Spatial vibration protection in a turbopump of hydrogen rocket engines
- Викунин А.В., Ярославцев Н.Л., Чеснова В.А.* 94 *Vikulin A.V., Yaroslavtsev N.L., and Chesnova V.A.*
Диагностика эффективности работы системы охлаждения малогабаритных теплообменников с компланарными каналами
Diagnostics of efficiency for a cooling system of compact heat exchangers with coplanar channels
- Колодяжный Д.Ю., Назорный В.С.* 100 *Kolodyazhnyi D.Yu. and Nagornyi V.S.*
Сообщение электрического заряда каплям углеводородных топлив в резко неоднородном электрическом поле в форсуночных модулях
Electric charge imposition on hydrocarbon fuel drops in sharply inhomogeneous electric field of injector modules
- Мингазов Б.Г., Бакланов А.В.* 106 *Mingazov B.G. and Baklanov A.V.*
Исследование стабилизации пламени в модельной камере сгорания ГТД
Study of flame stabilization in a model gas turbine combustor
- Теория авиационных и ракетных двигателей**
Aircraft and rocket engine theory
- Анисимова И.В., Гортышов Ю.Ф., Игнат'ев В.Н.* 111 *Anisimova I.V., Gortyshov Yu.F., and Ignat'ev V.N.*
К проблеме снижения гидродинамического сопротивления в устройствах энергоустановок
On a problem of reducing the hydrodynamic drag in the pipelines of power plants
- Москаленко Н.И., Мисбахов Р.Ш., Багаутдинов И.З., Локтев Н.Ф., Додов И.Р.* 116 *Moskalenko N.I., Misbakhov R.Sh., Bagautdinov I.Z., Loktev N.F., and Dodov I.R.*
Определение ингредиентного состава атмосферных выбросов продуктов сгорания турбореактивного двигателя методом тонкоструктурной спектроскопии
Determination of ingredient composition of air pollution combustion emissions from turbojet engines by the fine structure spectroscopy
- Авиационные приборы и измерительно-вычислительные комплексы**
Aircraft instruments and instrumentation computer complexes
- Гречишников В.М., Теряева О.В.* 122 *Grechishnikov V.M. and Teryaeva O.V.*
Волоконно-оптические преобразователи бортовых датчиков положения механизации летательного аппарата
Fiber-optical converters of onboard position sensors for aircraft mechanization devices
- Технология авиационного производства**
Aircraft production technologies
- Халиулин В.И., Батраков В.В.* 129 *Khaliulin V.I. and Batrakov V.V.*
Анализ применения инновационных методов для производства интегральных конструкций из композитов
Analysis of innovative methods application for production of composite integral parts
- ТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАМЕТКИ**
TECHNICAL NOTES
- Проектирование и доводка авиационных и ракетных двигателей**
Aircraft and rocket engine design and development
- Барсуков В.Д., Голдаев С.В., Минькова Н.П., Бабушкин Н.А.* 134 *Barsukov V.D., Goldaev S.V., Min'kova N.P., and Babushkin N.A.*
К расчету подводного зажигания двухосновного твердого топлива спиралью накаливания с металлическим экраном
On the calculation of dibasic solid propellant underwater ignition by an incandescence spiral with a metal screen

Журнал «Известия вузов. Авиационная техника» включен в утвержденный ВАК Перечень ведущих рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

Н.И. МОСКАЛЕНКО,
 д-р физ.-мат. наук,
Р.Ш. МИСБАХОВ,
 канд. техн. наук,
И.З. БАГАУТДИНОВ,
Н.Ф. ЛОКТЕВ,
И.Р. ДОДОВ
 (КТЭУ, Казань)
 NikMoskalenko@list.ru
 zerdex84@mail.ru
 ilyas_81992@mail.ru
 niklok@yandex.ru
 utisey@gmail.com

Определение ингредиентного состава атмосферных выбросов продуктов сгорания турбореактивного двигателя методом тонкоструктурной спектроскопии

Рассматривается применение метода тонкоструктурной поглощающей спектроскопии для определения ингредиентного состава атмосферных выбросов продуктов сгорания турбореактивного двигателя. Обсуждается технология выполнения измерений и обработки спектрометрических данных измерений.

Функция спектрального пропускания, спектральная линия поглощения, продукты сгорания, дисперсная фаза, ингредиентный состав

Ингредиентный состав продуктов сгорания необходим для решения задач расчета радиационного теплообмена в энергетических агрегатах и определения эффективности его функционирования. Ингредиенты продуктов сгорания оказывают токсическое и канцерогенное воздействие на флору и фауну, а сильная поглощающая способность антропогенных атмосферных выбросов существенно влияет на процессы теплообмена в системе солнце – атмосфера – подстилающая поверхность. В последние десятилетия интенсивно развивались оптические методы анализа ингредиентного состава продуктов сгорания, одним из которых является метод тонкоструктурной спектроскопии и спектрорадиометрии, успешно использовавшийся в работах [1–3] для определения ингредиентного состава продуктов сгорания различных топлив на лабораторных измерительных комплексах [3] и в камерах сгорания котельных установок. В настоящей работе рассматривается применение метода тонкоструктурной спектроскопии для измерений ингредиентного состава продуктов сгорания турбореактивных двигателей.

Спектральный измерительный комплекс включает [4–6] вакуумный осветитель, многоходовую рабочую камеру с внутренним и внешним обогревом, монохроматор среднего разрешения для измерения спектров поглощения в широком спектральном диапазоне 0,3...25 мкм, модернизированный спектрометр ИКС–21 с набором дифракционных решеток, работающих во втором порядке дифракции, растровый спектрометр Жирара высокого спектрального разрешения $\Delta = 0,05 \div 0,1 \text{ см}^{-1}$. Согласование различных модулей спектрального измерительного комплекса выполняется с помощью оптических приставок. Измерительный комплекс использовался для регистрации как спектров ослабления излучения исследуемой среды в рабочей камере, так и излучения этой среды с целью выявления возможности дистанционной диагностики следов аэроносителей по их тепловому излучению [5, 7]. Выполненные измерения показали, что спектры поглощательной способности среды совпадают со спектрами излучательной способности среды в пределах погрешности измерений, которые не превышали 2–3 % в газовых средах при температурах 300–900 К. Проиллюстрируем записанные спектрограммы. На рис. 1 приведен пример спектра поглощения CO в диапазоне 2148...2167 см^{-1} при разрешении $\Delta = 0,06 \text{ см}^{-1}$, на рис. 2 – пример спектра HCl в окрестности частот 2864 и 2842 см^{-1} при разрешении $\Delta = 0,09 \text{ см}^{-1}$.

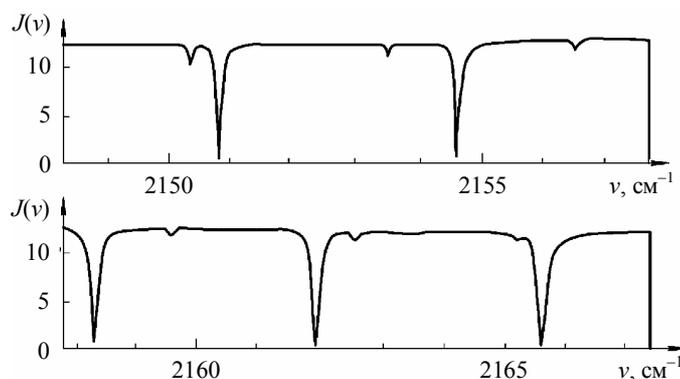


Рис. 1

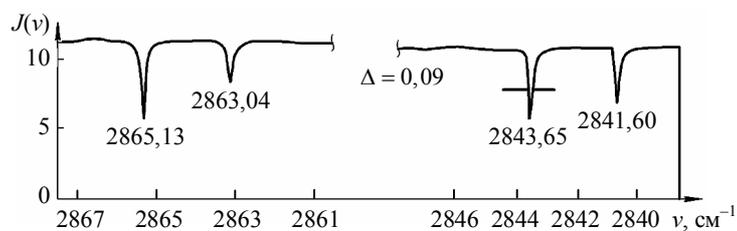


Рис. 2

Функция спектрального пропускания (ФСП) определяется из измеренных спектрограмм $J(v)$ по формуле $\tau(v) = J(v)/J_0(v)$, где $J_0(v)$ – базовая линия. В участках спектра, где спектральные линии отсутствуют (окна прозрачности), ФСП определяется только ослаблением излучения дисперсной фазой, и из значений $\tau(v)$ в окнах прозрачности определяется объемная концентрация летучего золя. Для аппаратной функции спектрометра δ_v

$$\tau_{\delta_v} = \tau_{\delta_v}^0 / \tau_a(v),$$

где $\tau_{\delta_v}^0$ – ФСП с учетом молекулярного поглощения и ослабления излучения аэрозолем; $\tau_a(v)$ – ФСП аэрозоля. Для многокомпонентной среды

$$\tau_{\delta_v} = \prod_i \tau_{i\delta_v},$$

где $\tau_{i\delta_v}$ – ФСП для i -го компонента газовой фазы. В случае высокого спектрального разрешения функцию $A_{\delta_v} = |\ln \tau_{\delta_v}|$ разложим на отдельные составляющие, используя метод дифференциальных моментов. С этой целью измеренные спектры подвергаются разбиению с шагом $\delta = \Delta/5$, где Δ – спектральное разрешение спектрометра. Уменьшение случайных шумов достигается процедурой сглаживания по пяти точкам сплайном в виде полинома 5-й степени. Полученный в цифровом виде спектр подвергается разложению по индивидуальным компонентам линий

$$A(v) = \sum_{m=1}^M A_m \left[\sum_{n=1}^N A_{mn} (v - v_m^0)^n \right]^{-1},$$

где A_m – максимум интенсивности m -го компонента; A_{mn} – коэффициенты обобщенного контура,

$$g_m = \frac{1}{\sum_{n=1}^N A_{mn} (v - v_m^0)^n}.$$

Характеристики A_{mn} дают полную информацию об отдельных контурах и определяются как коэффициенты разложения в ряд Тейлора некоторой функции $f_m(v)$, описывающей m -й контур

$$f_m(v) = \frac{1}{m} \sum_{n=0}^N A_{mn} (v - v_m^0)^n,$$

где значение A_{mn} является максимумом амплитуды контура. Центр v_m^0 определяется из условия равенства нулю коэффициента A_{m1} , значение полуширины m -й линии получается из соотношения

$$\alpha_{L_m} \sqrt{\frac{\sqrt{A_{m2}^2 + 4A_{m4}} - A_{m2}}{2A_{m4}}}.$$

Полученные таким образом профили восстанавливаются с учетом влияния аппаратной функции спектрометра [1, 2].

Таким образом, имеем отдельные контуры функции $A_m(v)$ с центрами v_m^0 , которые отождествляются по ингредиентам на основе априорной информации по центрам их спектральных линий. Идентифицированные линии поглощения обозначим знаком « i » – номера ингредиентов; их центры, контуры, полуши-

рины v_m^{0i} , $K_m^i(v)$, α_m^i содержат информацию о концентрации ингредиента. Действительно, для лоренцевского контура $b_m^i(v)$

$$K_n^i(v) = \frac{A_m^i(v)}{\omega_i}, \quad S_m^i = \int K_m^i(v) dv = K_{vm}^i \pi \alpha_m^i,$$

где S_m^i – интенсивность m -й линии ингредиента i ; K_{vm}^i – коэффициент поглощения в центре линии; α_m^i – полуширина m -й линии компонента i ; $\omega_i = \rho_i L$, L – длина оптического пути в рабочей камере, ρ_i – объемная концентрация ингредиента i ; $\alpha_m^i = \alpha_{0m}^i P_3$; P_3 – эффективное давление в рабочей камере, α_{0m}^i – полуширина линии при стандартном давлении

$$P_3 = P_{iN_2} + \sum_{K=1}^N P_K B_{ik}.$$

При определении концентрации летучих ингредиентов в настоящей работе использованы экспериментальные данные по параметрам спектральных линий [8–18], пересчитанные на температуру рабочей камеры по соотношениям, представленным в работах [8, 13, 18, 19].

Определение микроструктуры сажевого золя в продуктах сгорания оптическим методом представляет собой обратную задачу, для решения которой требуется априорная информация по оптическим характеристикам сажевого золя различных микроструктурных образований, перекрывающих всю область вариаций спектральных зависимостей коэффициентов поглощения и ослабления излучения. При этом опорные длины волн (каналы измерений) должны быть выбраны в окнах прозрачности газовой фазы продуктов сгорания с минимальными значениями вклада их интенсивности излучения в процесс поглощения излучения в регистрируемых спектрах ослабления излучения. Спектр регистрации излучения при этом должен включать длины волн в ультрафиолетовом видимом и инфракрасном диапазонах спектра [20].

Оптимизация решения задачи восстановления микроструктуры золя из спектров ослабления излучения проводится из условия

$$\sum_i \frac{\Delta \sigma_{\alpha \lambda i}}{\sigma_{\alpha \lambda i}} = \min,$$

где $\Delta \sigma_{\alpha \lambda i}$ – отклонения в спектральной зависимости коэффициента ослабления восстановленного спектра $\sigma_{\alpha \lambda i}$ от измеренного; i – номер канала измерений.

Частицы представляют собой пористые структуры, в их составе – растворимая фракция и включения газовой фазы. Измерения показали, что плотность сажевого золя зависит от режима горения [20] и изменяется в пределах значений $\rho \in \{1, 9; 2, 4\}$ при этом растворимая фракция золя составляет приблизительно 10 % от полной массы частиц при сжигании газового топлива. В соответствии с указанным составом частиц золя были вычислены оптические характеристики модельных микроструктур частиц сажевого золя для модифицированных гамма-распределений с модальными радиусами частиц $1,6 \cdot 10^{-3} \dots 2,25$ мкм. Электронная база данных [20] использовалась для определения микроструктуры сажевого золя из данных спектральных оптических измерений, при этом расчет микроструктуры основан на восстановлении ФСП аэрозоля $\tau_{\alpha \lambda}$ измеренных спектров ослабления излучения и определении спектральной зависимости $\sigma_{\alpha \lambda}$. Выбор приближения $\sigma_{\alpha \lambda}^0$ проводится в соответствии с соотношением [9]. Далее определяется микроструктура сажевого золя с использованием итерационной процедуры уточнения решений методом возмущений (метод спуска по Тихонову) с соблюдением нормировки микроструктуры каждой итерации по соотношению

$$\sum_k \ln \tau_{ak}(\lambda = 0,55 \text{ мкм}) = \ln \tau_a(\lambda = 0,55 \text{ мкм}),$$

где k – номер фракции, включая фракцию нулевого приближения; τ_a – ФСП аэрозоля для $\lambda = 0,55$ мкм.

Суть задачи восстановления микроструктуры золя заключается в определении весовых фракций числа частиц $N_i(r)$, которые опишут спектральную зависимость измеренных коэффициентов поглощения и ослабления излучения золям.

В табл. 1–3 представлен ингредиентный состав газовой фазы продуктов сгорания атмосферных выбросов авиационных турбореактивных двигателей. Основными оптически активными ингредиентами, определяющими радиационный теплообмен в двигателе и атмосферном следе самолета, являются пары H_2O , CO_2 , CO . Значительная концентрация CO в продуктах сгорания наблюдается для всех двигателей и в ряде случаев достигает 50 % от концентрации CO_2 . Следовыми компонентами являются окиси азота NO , NO_2 , N_2O . Летучие и слаболетучие углеводороды в атмосфере в результате фотохимических реакций превращаются в CH_4 , и сажевый золь CO в присутствии NO также превращается в CH_4 , вызывая усиление парникового эффекта атмосферы. Тяжелые углеводороды (спирты, фенолы) разрушаются в результате окисления тропосферным озоном, вызывая снижение его концентрации. В продуктах сгорания наблюдаются также следы H_2O_2 , SO_2 , $HCON$.

Таблица 1

Двигатель	Объемная концентрация ингредиента (в процентах)				
	H_2O	CO_2	CO	N_2	O_2
P-27B-300	6,9	4,77	1,27	75,9	10,1
P-25-300	6,1	4,1	1,95	76,8	11,1
P-9-B	5,3	3,1	2,2	77,3	12,1

Таблица 2

Двигатель	Объемная концентрация ингредиента (ppm)								
	NO	NO_2	N_2O	$HCON$	C_2H_2	C_2H_4	C_2H_6	CH_4	CH_3OH
P-27B-300	80	25	3	20	34	30	10	56	90
P-25-300	75	23	3	25	30	26	12	60	75
P-9-B	60	20	4	30	30	20	14	46	60

Таблица 3

Двигатель	Объемная концентрация ингредиента (ppm)									
	C_2H_4O	C_4H_3O	C_6H_6O	C_6H_6	$C_6H_5CH_2$	$C_6H_4(CH_3)_2$	Стирол	SO_2	H_2O_2	Бензальдегид
P-27B-300	30	15	50	160	100	90	80	4	38	50
P-25-300	30	15	55	150	110	95	90	4	40	56
P-9-B	25	23	70	120	130	120	110	4	45	80

Дисперсная фаза продуктов сгорания авиационного керосина в двигателе вызвана образованием сажевого золя в результате ионной нуклеации из газовой фазы с последующей гетерогенной коагуляцией. Скорость образования первичного золя зависит от электрических свойств среды горения топлива. Экспериментальные данные и теоретическое рассмотрение механизма образования золя показывает, что в пламенах остаются частицы радиусом $r \geq 0,001$ мкм. Наиболее вероятный радиус частиц первичного золя $r_m = 0,003$ мкм [9, 20, 21]. Дальнейший рост частиц первичного золя обусловлен гетерогенной коагуляцией, эффективность которой зависит как от числовой плотности частиц первичного золя, их электрических свойств, так и от времени пребывания частиц в двигателе. Микроструктуру сажевого золя можно описать соотношением

$$\frac{f[r(t)]}{f_0(r)} = \sum_i \left[1 + \frac{1}{2} K_i n_{0i} \ln \left(\frac{1 + \alpha_i t}{\alpha_i} \right) \right]^{1/3} + \sum_{i \neq k} \left[1 + \frac{1}{2} K_{ik} (n_{0i} n_{0k})^{1/2} \ln \left(\frac{1 + \alpha_{ik} t}{\alpha_{ik}} \right) \right]^{1/3},$$

где $f_0(r)$ – начальное распределение числа частиц по размерам при горении топлива; t – время пребывания продуктов сгорания в двигателе; $f[r(t)]$ – распределение числа частиц на выходе из сопла двигателя; K_i , K_{ik} – коэффициенты коагуляции.

Величины α_i^{-1} , α_{ik}^{-1} определяют время, в течение которого размер частиц i или $i - k$ удвоится. Меняя значения $\alpha_i(t)$, $\alpha_{ik}(t)$, $K_i(t)$, $K_{ik}(t)$, можно учесть влияние гетерогенной и гомогенной коагуляции на временные вариации микроструктуры золя.

Изменение микроструктуры золя приводит к вариациям спектральных зависимостей его оптических характеристик: коэффициентов поглощения излучения, рассеяния излучения частицами и индикатрисы рассеяния. Результаты обработки спектральных коэффициентов ослабления излучения продуктами сго-

рания показали, что микроструктура сажевого золя может быть описана в виде суперпозиции трех гамма-распределений вида

$$f(r_a) = Ar^a \exp[-br^c],$$

где параметры a , b , c определяют форму кривой распределения числа частиц по размерам. Модальный радиус

$$r_m = \left(\frac{a}{bc}\right)^{1/c}.$$

Параметры a , b , c , r_m принимают значения: 1; 50; 0,5; $1,6 \cdot 10^{-3}$ мкм, 0,2; 6; 0,5; $4,4 \cdot 10^{-3}$ мкм, 1; 9; 0,5; $4,9 \cdot 10^{-2}$ мкм для трех гамма-распределений микроструктуры частиц золя соответственно.

Оптические характеристики сажевого золя (нормированные коэффициенты поглощения, рассеяния и индикатрисы рассеяния) рассчитаны для указанных распределений по спектру длин волн в спектральном диапазоне 0,2...50 мкм. Оптическая плотность сажевого золя $\frac{\partial \tau_a}{\partial L}$ определяется по данным измерений оптической толщины на длине волны $\lambda = 0,55$ мкм и варьирует в диапазоне $\frac{\partial \tau_a}{\partial L} \in \{0,03; 0,05\} \text{ м}^{-1}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Москаленко Н.И., Сафиуллина Я.С. Применение метода тонкоструктурной спектроскопии для определения ингредиентного состава продуктов сгорания топлив // Проблемы энергетики. 2009. № 11-12. С. 22–32.
2. Москаленко Н.И. и др. Идентификация ингредиентов и определение ингредиентного состава атмосферных выбросов и продуктов сгорания методом тонкоструктурной спектрометрии // Альтернативная энергетика и экология. 2010. № 2. С. 43–54.
3. Исаев А.И., Сафарбаков А.М., Майрович Ю.И. Выбор завихрителя для импульсной камеры сгорания // Изв. вузов. Авиационная техника. 2013. № 4. С. 63–67.
4. Москаленко Н.И. и др. Аппаратура для комплексных исследований характеристик молекулярного поглощения радиации атмосферными газами // Журнал прикладной спектроскопии. 1973. Т. 19. № 4. С. 752–756.
5. Техника и технология в XXI веке: современное состояние и перспективы развития / Под общ. ред. С.С. Чернова. Новосибирск: ЦРНС, 2009. С. 13–47.
6. Гуреев В.М. и др. Технологические возможности повышения эффективности энергоустановок на базе газотурбинного двигателя // Изв. вузов. Авиационная техника. 2013. № 2. С. 57–60.
7. Optoelectronics – devices and applications / Edited by Predeep P. Croatia: Intechweb.org, 2011. 630 p.
8. Кондратьев К.Я., Москаленко Н.И. Тепловое излучение планет. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 264 с.
9. Кондратьев К.Я., Москаленко Н.И., Поздняков Д.В. Атмосферный аэрозоль. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 225 с.
10. Москаленко Н.И., Мирумьянц С.О. Атлас спектров прозрачности по произвольно ориентированным трассам атмосферы. М.: ЦНИИ и ГЭИ, 1979. 494 с.
11. Москаленко Н.И., Локтев Н.Ф. Методы моделирования переноса селективного излучения в структурно-неоднородных средах // Тепловые процессы в технике. 2009. Т. 1. № 10. С. 432–435.
12. Москаленко Н.И. и др. Равновесные и неравновесные процессы излучения: высокие температуры, радиационный теплообмен. Казань: КГЭУ, 2015. 267 с.
13. Москаленко Н.И., Ильин Ю.А., Каюмова Г.В. Измерительный комплекс высокого разрешения для исследования пламени // Журнал прикладной спектроскопии. 1992. Т. 56. № 1. С. 122–127.
14. Москаленко Н.И., Зотов О.В., Мирумьянц С.О. Экспериментальное исследование параметров спектральных линий поглощения CO_2 // Журнал прикладной спектроскопии. 1975. Т. 21. № 5. С. 893–899.
15. Москаленко Н.И. Измерение интенсивности и полуширины спектральных линий поглощения основной полосы 0–1 CO // Оптика и спектроскопия. 1975. Т. 38. № 4. С. 676–680.
16. Гортьшов Ю.Ф. и др. Влияние добавок водорода в топливо на характеристики газопоршневого двигателя при изменении угла опережения зажигания // Изв. вузов. Авиационная техника. 2009. № 4. С. 73–74.
17. Каюмова Г.В., Москаленко Н.И. Атлас параметров спектральных линий и поглощение излучения атмосферными CO, NO, HCL // Тезисы докладов 5-го Всесоюз. симпозиума по распространению лазерного излучения в атмосфере, г. Томск, 12 сент. 1979. Ч. 3. С. 182–186.
18. Rosman L.S. et al. The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2009. Vol. 110. Iss. 9-10. P. 533–572.

19. Цатиашвили В.В. Влияние скорости смешения реагентов в диффузионном пламени на эмиссию оксидов азота // Изв. вузов. Авиационная техника. 2013. № 1. С. 38–43.
20. Москаленко Н.И., Сафиуллина Я.С., Загидуллин Р.А. Микроструктура и радиационные характеристики сажевого золя в пламенах и антропогенных выбросах продуктов сгорания // Проблемы энергетики. 2013. № 5-6. С. 23–32.
21. Маркушин А.Н., Бакланов А.В., Цыганов Н.Е. Улучшение эмиссионных характеристик авиапроизводного ГТД применением микрофакельного горения в укороченной камере // Изв. вузов. Авиационная техника. 2013. № 4. С. 59–62.

Поступила в редакцию 16.04.15

Determination of Ingredient Composition of Air Pollution Combustion Emissions from Turbojet Engines by the Fine Structure Spectroscopy

MOSKALENKO N.I., MISBAKHOV R.SH.,
BAGAUDINOV I.Z., LOKTEV N.F., AND DODOV I.R.

We consider the application of the method of absorbing fine-structure spectroscopy to determine the ingredient composition of air pollution combustion emissions for the turbojet engine. The measurement technology and data processing of the spectrometric measurements are discussed.

Spectral transmission function, spectral line of absorption, combustion products, dispersed phase, ingredient composition