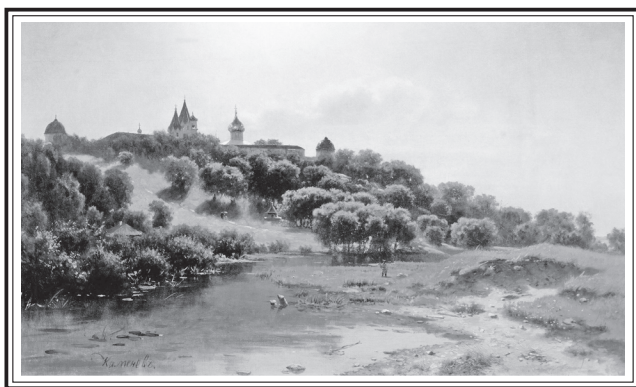


# ПРОГРАММА

*XX Школы-семинара молодых ученых и специалистов  
под руководством академика РАН А.И. Леонтьева*

## ПРОБЛЕМЫ ГАЗОДИНАМИКИ И ТЕПЛОМАССОБМЕНА В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ



24 – 29 мая 2015 года  
г. Звенигород, Россия

*гин И.М., Пиралишвили Ш.А. (Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П.А. Соловьёва), Маркович Д.М. (Институт теплофизики СО РАН им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск)*

19. Определение поля скорости в конвективной струе в жидкости различными методами. — *Рег. № 101*

*Пилипюк Д.С. (Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова)*

20. Применение метода тонкоструктурной спектрометрии для определения ингредиентного состава атмосферных выбросов авиационных турбореактивных двигателей. — *Рег. № 112*

*Москаленко Н.И., Додов И.Р., Локтев Н.Ф. (Казанский государственный энергетический университет)*

21. Исследование процессов вихреобразования в канале переменного сечения. — *Рег. № 116*

*Митрофанова О.В., Подзоров Г.Д. (Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва)*

22. Масштабный эффект в металлогидридных материалах для очистки и хранения водорода. — *Рег. № 126*

*Пыхтина А.И., Романов И.А. (Объединённый институт высоких температур РАН, Москва)*

23. Параметры электрических разрядов, формирующихся над свободной поверхностью расплавленного металла. — *Рег. № 130*

*Клементьева И.Б., Пинчук М.Э., Тепляков И.О. (Объединённый институт высоких температур РАН, Москва)*

24. Структура течения и теплоотдача за выступом в канале на переходных режимах в пульсирующем потоке. — *Рег. № 134*

*Малюков А.В., Душина О.А., Молочников В.М., Паерелий А.А. (Казанский научный центр РАН, Исследовательский центр проблем энергетики)*

Н.И. Москаленко, И.Р. Додов, Н.Ф. Локтев

Казанский государственный энергетический университет, Россия

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ТОНКОСТРУКТУРНОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНГРЕДИЕНТНОГО СОСТАВА АТМОСФЕРНЫХ ВЫБРОСОВ АВИАЦИОННЫХ ТУРБОРЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

### АННОТАЦИЯ

Рассматривается применение метода тонкоструктурной поглощающей спектроскопии для определения ингредиентного состава атмосферных выбросов продуктов сгорания турбореактивного двигателя. Применённый для исследований ингредиентного состава спектрофотометрический комплекс аппаратуры обеспечивает измерение концентрации различных ингредиентов в продуктах сгорания с предельной чувствительностью 1–10 ppm. Обсуждается технология выполнения измерений и обработки спектрометрических данных измерений. Анализируются результаты измерений ингредиентного состава выбрасываемых в атмосферу продуктов сгорания турбореактивного двигателя.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Ингредиентный состав продуктов сгорания необходим для решения задач расчета радиационного теплообмена в энергетических агрегатах и определения эффективности его функционирования. Выброшенные в атмосферу продукты сгорания имеют ингредиенты, оказывающие токсическое и канцерогенное воздействие на флору и фауну, а сильная поглощающая способность антропогенных атмосферных выбросов оказывает существенное влияние 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 спектрометриии, который успешно использовался в работах [1,2] 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. При этом продукты сгорания для выполнения анализа отбирались на выходе из сопла турбореактивного двигателя с помощью пробозаборного устройства и по газоходу отбирались в пробозаборники. Последние далее транспортировались в лабораторию спектральных измерений для

последующего анализа регистрируемых спектров поглощения излучения.

### 2. МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ИНГРЕДИЕНТОВ ИЗ СПЕКТРОВ ПОГЛОЩЕНИЯ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Примеры спектрограмм поглощения излучения  $\text{HCl}$  и  $\text{CO}$  высокого спектрального разрешения, характеризующих функциональные возможности измерительного комплекса, представлены на рис. 1–2.

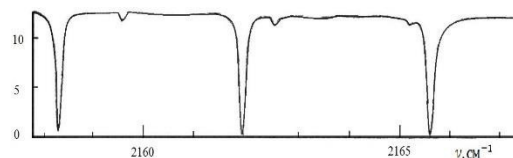


Рис.1. Пример спектра поглощения  $\text{CO}$  в диапазоне 2148–2167  $\text{cm}^{-1}$  при разрешении  $\Delta = 0.06 \text{ cm}^{-1}$

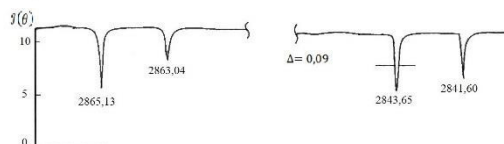


Рис.2. Пример спектра  $\text{HCl}$  в окрестности частот 2864 и 2842  $\text{cm}^{-1}$  измеренные с разрешением  $\Delta = 0.09 \text{ cm}^{-1}$

Функция спектрального пропускания (ФСП) определяется из измеренных спектрограмм  $\mathcal{J}(\nu)$  по формуле  $\tau(\nu) = \mathcal{J}(\nu)/\mathcal{J}_0(\nu)$ , где  $\mathcal{J}_0(\nu)$  – базовая линия. В участках спектра, где спектральные линии отсутствуют (окна прозрачности), ФСП определяется только ослаблением излучения дисперсной фазой и из значений  $\tau(\nu)$  в окнах прозрачности определяется объемная концентрация летучего золя. Для аппаратной функции спектрометра  $\delta_\nu$

$$\tau_{\delta_\nu} = \tau_{\delta_\nu}^\circ / \tau_a(\nu), \quad (1)$$

где  $\tau_{\delta_\nu}^\circ$  – функция спектрального ослабления излучения с учетом молекулярного поглощения и ослабления излучения аэрозолем;  $\tau_a(\nu)$  –

спектральная функция ослабления излучения аэрозолям. Для многокомпонентной среды

$$\tau_{\delta\nu} = \prod_i \tau_{i\delta\nu}, \quad (2)$$

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

$$A(\nu) = \sum_{m=1}^M A_m [\sum_{n=1}^N A_{mn} (\nu - \nu_m^\circ)^n]^{-1}, \quad (3)$$

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

$$g_m = 1/\sum A_{mn} (\nu - \nu_m^\circ)^n. \quad (4)$$

Характеристики  $A_{mn}$  дают полную информацию об отдельных контурах и определяются как коэффициенты разложения в ряд Тейлора некоторой функции  $f_m(\nu)$ , описывающей  $m$  – ый контур:

$$f_m(\nu) = \frac{1}{m} \sum_{n=0}^N A_{mn} (\nu - \nu_m^\circ)^n, \quad (5)$$

значение  $A_{mn}$  является максимумом амплитуды контура. Центр  $\nu_m^\circ$  определяется из условия равенства нулю коэффициента  $A_{m1}$ , значение полуширины  $m$  – ой линий получается из соотношения

$$L_m = \sqrt{\frac{A_{m2}^2 + 4A_{m4} - A_{m2}}{2A_{m4}}}. \quad (6)$$

Полученные таким образом профили восстанавливаются на влияние аппаратной функции спектрометра [1,2].

Итак, мы имеем отдельные контуры функции  $A_m(\nu)$  с центрами  $\nu_m^\circ$ , которые отождествляются по ингредиентам на основе априорной информации по центрам их спектральных линий. Идентифицированные линии поглощения обозначим знаком  $i$  – номера ингредиента и их центры, контура, полуширины  $\nu_m^{oi}$ ,  $K_m^i(\nu)$ ,  $\alpha_m^i$  содержат информацию о концентрации ингредиента. Действительно, для лоренцевского контура  $b_m^i(\nu)$

$$K_m^i(\nu) = A_m^i(\nu),$$

$$S_m^i = \int K_m^i(\nu) d\nu = K_{vm}^i \cdot \pi \cdot \alpha_m^i, \quad (7)$$

где  $\omega_i = \rho_i L$ ,  $S_{mi}$  – интенсивность  $m$  – ой линии ингредиента  $i$ ;  $K_{vm}^i$  – коэффициент поглощения в центре линии;  $\alpha_m^i$  – полуширина  $m$  – ой линии компонента  $i$ ;  $L$  – длина оптического пути в

рабочей камере;  $\alpha_{om}^i$  – полуширина линии при стандартном давлении,  $\rho_i$  – объемная концентрация ингредиента  $i$ ;  $\alpha_m^i = \alpha_{om}^i \cdot P_3$ ;  $P_3$  – эффективное давление в рабочей камере;  $\alpha_{om}^i$  – полуширина линии при стандартном давлении

$$P_3 = P_{iN_2} + \sum_{K=1}^N P_K B_{ik}, \quad (8)$$

При определении концентрации летучих ингредиентов в настоящей работе использованы экспериментальные данные по параметрам спектральных линий [7–10], пересчитанные на температуру рабочей камеры по соотношениям, представленным в [7].

### 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ

Определение микроструктуры сажевого золя в продуктах сгорания оптическим методом представляет собой обратную задачу, требующую для своего решения априорной информации по оптическим характеристикам сажевого золя различных микроструктурных образований, перекрывающих всю область спектральных 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 поглощения излучения в регистрируемые спектры ослабления излучения и включать длины волн в ультрафиолетовом видимом и инфракрасном диапазонах спектра [6]. Оптимизация решения задачи восстановления микроструктуры золя из спектров ослабления излучения проводится из условия

$$\sum_i \frac{\Delta\sigma_{ali}}{\sigma_{ali}} = \min, \quad (9)$$

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

Частицы представляют собой пористые структуры и включают в своём составе растворимую фракцию и включения газовой фазы. Измерения плотности сажевого золя показали, что она зависит от режима горения [6] и изменяется в пределах значений  $\rho \in \{1.9; 2.4\}$  при этом растворимая фракция золя составляет  $\approx 10\%$  от полной массы частиц при сжигании газового топлива. В соответствии с указанным составом частиц золя были вычислены ОХ модельных микроструктур частиц сажевого золя для модифицированных гамма-распределений с модальными радиусами частиц от  $1.6 \cdot 10^{-3}$  до  $2.25 \text{ мкм}$ . Электронная база данных [6] использовалась для определения микроструктуры сажевого золя из данных спектральных оптических измерений, которая берёт своё начало

с восстановления ФСП аэрозоля  $\tau_{a\lambda}$  измеренных спектров ослабления излучения и определения спектральной зависимости  $\sigma_{a\lambda}$ . Выбор приближения  $\sigma_{a\lambda}^0$  производится в соответствии с соотношением (9). Далее производится определение микроструктуры 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,  $\tau_a$  – ФСП аэрозоля для  $\lambda = 0.55 \text{ мкм}$ .

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

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

В таблице 1 представлен ингредиентный состав газовой фазы продуктов сгорания атмосферных выбросов авиационных

турбореактивных двигателей Р-27В-300, Р-25-300, Р-9В. Основными оптически активными ингредиентами, определяющими радиационный теплообмен в двигателе и в атмосферном следе самолета являются пары  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ . Значительная концентрация  $\text{CO}$  в продуктах сгорания наблюдается для всех двигателей и в ряде случаев достигает 50% от концентрации  $\text{CO}_2$ . Следовыми компонентами являются окислы азота  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ . Летучие и слаболетучие углеводороды в атмосфере в результате фотохимических реакций превращаются в  $\text{CH}_4$  и сажевый золь.  $\text{CO}$  в присутствии  $\text{NO}$  также превращается в  $\text{CH}_4$ , 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 перекиси водорода  $\text{H}_2\text{O}_2$ , оксида серы  $\text{SO}_2$ , формальдегида  $\text{НСОН}$ .

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

Таблица 1. Ингредиентный состав газовой фазы продуктов сгорания атмосферных выбросов авиационных турбореактивных двигателей

Двигатель	Объемная концентрация ингредиента							
	$\text{H}_2\text{O}$	$\text{CO}_2$	$\text{CO}$	$\text{N}_2$	$\text{O}_2$	$\text{NO}$	$\text{NO}_2$	$\text{NO}_2$
Р-27В-300	6.9%	4.77%	1.27%	75.9%	10.1%	80 <i>ppm</i>	25 <i>ppm</i>	3 <i>ppm</i>
Р-25-300	6.1%	4.1%	1.95%	76.8%	11.1%	75 <i>ppm</i>	23 <i>ppm</i>	3 <i>ppm</i>
Р-9В	5.3%	3.1%	2.2%	77.3%	12.1%	60 <i>ppm</i>	20 <i>ppm</i>	4 <i>ppm</i>
–	$\text{НСОН}$	$\text{C}_2\text{H}_2$	$\text{C}_2\text{H}_4$	$\text{C}_2\text{H}_6$	$\text{CH}_4$	$\text{CH}_3\text{OH}$	$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$	$\text{C}_4\text{H}_3\text{O}$
Р-27В-300	20 <i>ppm</i>	34 <i>ppm</i>	30 <i>ppm</i>	10 <i>ppm</i>	56 <i>ppm</i>	90 <i>ppm</i>	30 <i>ppm</i>	15 <i>ppm</i>
Р-25-300	25 <i>ppm</i>	30 <i>ppm</i>	26 <i>ppm</i>	12 <i>ppm</i>	60 <i>ppm</i>	75 <i>ppm</i>	30 <i>ppm</i>	15 <i>ppm</i>
Р-9В	30 <i>ppm</i>	30 <i>ppm</i>	20 <i>ppm</i>	14 <i>ppm</i>	46 <i>ppm</i>	60 <i>ppm</i>	25 <i>ppm</i>	23 <i>ppm</i>
–	$\text{C}_6\text{H}_6\text{O}$	$\text{C}_6\text{H}_6$	$\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_2$	$\text{C}_6\text{H}_4$ ( $\text{CH}_3$ ) <sub>2</sub>	стирол	$\text{SO}_2$	$\text{H}_2\text{O}_2$	бензолдегид
Р-27В-300	50 <i>ppm</i>	160 <i>ppm</i>	100 <i>ppm</i>	90 <i>ppm</i>	80 <i>ppm</i>	4 <i>ppm</i>	38 <i>ppm</i>	50 <i>ppm</i>
Р-25-300	55 <i>ppm</i>	150 <i>ppm</i>	110 <i>ppm</i>	95 <i>ppm</i>	90 <i>ppm</i>	4 <i>ppm</i>	40 <i>ppm</i>	56 <i>ppm</i>
Р-9В	70 <i>ppm</i>	120 <i>ppm</i>	130 <i>ppm</i>	120 <i>ppm</i>	110 <i>ppm</i>	4 <i>ppm</i>	45 <i>ppm</i>	80 <i>ppm</i>

золя зависит от электрических свойств среды горения топлива. Экспериментальные данные и теоретическое рассмотрение механизма

образования золя показывает, что в пламенах выживают частицы радиусом  $r \geq 0.001 \text{ мкм}$ . Наиболее вероятный радиус частиц первичного

золя  $r_m = 0.003 \text{ мкм}$  [6]. 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

$$\frac{f[r(t)]}{f_0(r)} = \sum_i \left[ 1 + \frac{1}{2} K_i n_{oi} \ln \left\{ \frac{1 + \alpha_i t}{\alpha_i} \right\} \right]^{1/3} + \sum_{i \neq k} \left[ 1 + \frac{1}{2} K_{ik} (n_{oi} \cdot n_{ok})^{1/2} \cdot \ln \left\{ \frac{1 + \alpha_{ik} t}{\alpha_{ik}} \right\} \right]^{1/3}, \quad (10)$$

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

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализован метод тонкоструктурной спектromетрии для определения ингредиентного состава продуктов сгорания авиационных турбореактивных двигателей, включая основные оптически активные ингредиенты малые компоненты: оксиды азота, легкие и тяжелые углеводороды, спирты и фенолы. Для сажевого золя анализируется его микроструктура и возможность диагностирования оптических характеристик.

## 6. СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$J_\nu$  – спектрограмма прошедшего через среду излучения;  
 $J_{0\nu}$  – базовая линия;  
 $\delta_\nu$  – аппаратная функция спектрометра;  
 $\tau_{\delta\nu}^\circ$  – функция спектрального пропускания излучения с учетом молекулярного поглощения и ослабления излучения зодем;  
 $\tau_a(\nu)$  – спектральная функция ослабления излучения зодем;  
 $\tau_{\delta\nu}$  – функция спектрального пропускания газовой фазой продуктов сгорания;  
 $S$ ,  $\alpha$ ,  $\nu_0$  – соответственно интенсивность, ширина и положение спектральной линии.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Москаленко Н.И., Сафиуллина Я.С. Применение метода тонкоструктурной спектроскопии для определения ингредиентного состава продуктов сгорания топлив // Проблемы энергетики. 2009. № 1-2. С. 22-32.
2. Москаленко Н.И., Локтев Н.Ф., Сафиуллина Я.С., Садыкова М.С. Идентификация ингредиентов и определение

ингредиентного состава атмосферных выбросов и продуктов сгорания методом тонкоструктурной спектromетрии // Международ. науч. журнал «Альтернативная энергетика и экология». 2010. №2. С. 43-54.

3. Москаленко Н.И., Аверьянова А.В., Мирумянц С.О., Зотов О.В., Ильин Ю.А. Аппаратура для комплексных исследований характеристик молекулярного поглощения радиации атмосферными газами. // ЖПС. 1973. Т19. №4. С. 752-756.
4. Москаленко Н.И., Локтев Н.Ф. Численное моделирование в задачах дистанционной диагностики продуктов сгорания топлив и технологических сред. // Техника и технология в XXI веке: Современное состояние и перспективы развития.-Новосибирск. ЦРНС. 2009. С. 13-47.
5. Optoelectronics – devices and applications. (Edited by Predeep P.):Croatia. Intechweb. ORG. 2011. 630 p.
6. 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. №3. С.23-32.
7. Кондратьев К.Я., Москаленко Н.И. Тепловое излучение планет.– Л.: Гидрометеоиздат. 1977. 264 с.
8. Москаленко Н.И., Ильин Ю.А., Каюмова Г.В. Измерительный комплекс высокого разрешения для исследования пламени. // ЖПС. 1992. Т56, №1. С. 122-127.
9. Москаленко Н.И., Зотов О.В., Мирумянц С.О. Экспериментальное исследование параметров спектральных линий поглощения  $\text{CO}_2$ . // ЖПС. 1975. Т.21, №5. С.893-899.
10. 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.