ДИОДНАЯ ЛАЗЕРНАЯ АБСОРБЦИОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ В КАЧЕСТВЕ МЕТОДА ДИАГНОСТИКИ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ В РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

DIODE LASER ABSORPTION SPETROSCOPY AS A METHOD FOR DIAGNOSTICS OF COMBUSTION PROCESSES IN JET ENGINES

УДК 535.333

Зинатов А.Ю., студент, 3 курс, факультет «Энергомашиностроение», Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана, Россия, г. Москва

Zinatov A.Yu. zinatov-alexey@mail.ru

Аннотация: В статье рассматриваются диодная лазерная абсорбционная спектроскопия(ДЛАС) как один из перспективных способов оценки показателей реактивных двигателей. Основные теоретические формулы приведены в тексте. Также дана методика определения концентрации, с помощью которой можно определить эффективность двигателя. Рассмотрены базы данных на русском и английском языке, а также ресурсы, которые помогут в написании кода для автоматизации обработки информации.

Annotation: diode laser absorption spectroscopy is concidered in the article as one of promising methods to measurement of jet engine performance. Basic equations are given in the text. Also method of concentration calculation is given, which can help to calculate efficiency of jet engine. Database in Russian and English are considered by author. Recourses, which can help in writing code to automate calculations, are given in text.

Ключевые слова: реактивные двигатели, диодная лазерная абсорбционная спектроскопия, ДЛАС, диагностика горения.
Key words: jet engines, diode laser absorption spectroscopy, TDLAS, combustion diagnostics.

В современных условиях развития реактивных двигателей, работающих на химическом топливе, необходимо детальное исследование процессов горения. Необходимо исследовать физико-химические процессы, а также их эффективность.

При замере показателей реактивных двигателей традиционные контактные методы, основанные на введении в газовый поток измерительных зондов, становятся малопригодными. В условиях высокой температуры вводимые зонды нуждаются в адекватной системе охлаждения, что неизбежно приводит к увеличению их размеров и, соответственно, к недопустимому искажению потока. Диагностика эффективности работы двигателя, основанная на анализе химического состава забираемых проб газа, также проблематична, поскольку требует эффективной системы охлаждения для замораживания реакций в забираемых пробах.

В таких условиях возлагаются надежды на абсорбционную спетроскопию, которая может обеспечить бесконтактную диагностику в зоне горения. [1]

ДЛАС- метод, который позволяет наблюдать множество параметров горения, таких как температура, концентрация, скорость потока газа. В основе метода лежит свойство вещества поглощать излучение на определенных длинах волн. Преимуществом этого вида диагностики также является то, что он надежен и является относительно дешевым.

Для описания метода начнем с основных формул и уравнений, необходимых для вычислений.

Основным уравнением абсорбционной спектроскопии является закон Бугера-Ламберта. Общая экспоненциальная форма на случай малого поглощения и одиночной линии:

$$I_V = I_{V,0}\exp[-S(T)\varphi(v - v_0)NL] \approx I_{V,0} - I_{V,0}S(T)\varphi(v - v_0)NL \quad (1)$$

Где $I_{V,0}$ - интенсивность монохроматического излучения с частотой v ($см^{-1}$) после прохождения через поглощающую среду длиной L(см), v_0 ($см^{-1}$)– центральная частота линии, S(T) (см/моль) – сила линии (интегральная интенсивность), $\varphi(v - v_0)$ (см)– форма линии, N($см^{-3}$) – концентрация молекул.

Сила линии зависит от температуры, а форма линии зависит от температуры, давления, состава газа и механизма уширения.

Зависимость силы линии S(T) от температуры:

$$S(T) = S(T_0)\frac{Q(T_0)}{Q(T)}\left(\frac{T_0}{T}\right)\exp\left[-\frac{hcE''}{k}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right]\left[1 - \exp\left(-\frac{hc\nu_0}{kT}\right)\right]\cdot\left[1 - \exp\left(-\frac{hc\nu_0}{kT}\right)^{-1}\right] \quad (2)$$

где h – постоянная Планка, c – скорость света, k – постоянная Больцмана, $Q(T)$ – функция распределения поглощающей молекулы, T_0(К) – контрольная температура (обычно 296 K), и E'' – энергия нижнего состояния перехода.

Отношение сил линий двух разных переходов зависит только от температуры и может быть записан в виде (полагая, что вторая скобка в формуле (2) равна единице):

$$R = \frac{S_1(T_0, \nu_1)}{S_2(T_0, \nu_2)}\exp\left[-\left(\frac{\Delta E}{k}\right)\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \quad (3)$$

Где ΔE – разность энергий нижних уровней в выбранных переходах.

Таким образом при одновременном измерении поглощения на разных линиях можно определить температуру объекта, и из измерения интенсивности линии поглощения можно определить концентрацию поглощающих частиц при условии, что спектроскопические параметры выбранных переходов известны. [2]

Главным параметром, характеризующим эффективность сгорания топлива, а значит и качество двигателя, является коэффициент полноты сгорания η, определяемый методом ДЛАС как отношение фактической концентрации

продуктов сгорания (водяного пара) к расчетной (такой, если все молекулы топлива H2 вступят в реакцию с окислителем) или определяемый косвенными методами диагностики. Поэтому определение концентрации молекул H2O является конечной целью разрабатываемого метода ДЛАС со сканируемой длиной волны.

Так как при проведении эксперимента высок уровень шума и помех, а также высокая турбулентность, интегрирование спектра приведет к серьезным ошибкам. Поэтому необходимо аппроксимировать результаты эксперимента.

На основе базы данных HITRAN [3], симулируется участок спектра с выбранными линиями поглощения, а затем подгоняется под экспериментальные данные. В качестве подгоночных параметров используют: положение центра линии, температура, полное давление, концентрация молекул воды, коэффициент столкновительного уширения в воздухе, коэффициент самоуширения.

При реализации этого алгоритма возникают дополнительные трудности, связанные с тем, что в процессе горения изменяется не только температура, но и концентрация компонентов, а также полное давление смеси. Это вызывает изменение ширин линий поглощения, что усложняет алгоритм аппроксимации экспериментального спектра. Тем не менее данный способ является оптимальным для определения температуры при больших значениях сигнал/шум. [4]

Руководство по необходимым функциям, а также по работе с базой данных [5] на python представлено и детально объяснено в [6]. Также есть сайт с базами данных на русском языке [7].

Подводя итог, можно сказать, что использование ДЛАС может стать важным инструментом при конструировании реактивных двигателей. Так как имеет относительно невысокую стоимость, накопленные базы данных. Также есть возможность автоматизировать процесс вычислений с помощью уже имеющихся функций на языке программирования python.

Использованные источники:

1. В. В. Лигер, Ю. А. Курицын, В. Р. Мироненко, М. А. Большов, Я. Я. Понуровский, О. М. Колесников Измерение параметров нестационарных газовых потоков методом диодной лазерной абсорбционной спетроскопии в условиях повышенных температур и давлений. -2018. С. 92-103
2. M.A. Bolshov, Yu.A. Kuritsyn, Yu.V. Romanovskii - Tunable diode laser spectroscopy as a technique for combustion diagnostics.— С. 45–66.
3. L.S. Rothman, I.E. Gordon, Y. Babikov, A. Barbe, D. Chris Benner, P.F. et al., The HITRAN2012 Molecular Spectroscopic Database // J.Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, 2013. 130, 4-50 pp
4. Большов М.А., Курицын Ю.А., Лигер В.В., Мироненко В.Р. Разработка метода абсорбционной спектроскопии с диодными лазерами для определения температуры и концентрации молекул в удаленном обьекте // Оптика и спектроскопия, том 110, № 6, 2011. С. 900–908.
5. HITRAN is an acronym for high-resolution transmission molecular absorption database [Электронный ресурс]. URL: https://hitran.org/
6. Roman V. Kochanov HITRAN Application Programming Interface (HAPI). Manual ver. 4.3, 14 April 2019.
7. Информационная система "Спектроскопия атмосферных газов" (SPECTRA**)** [Электронный ресурс]. URL: https://spectra.iao.ru/

Used sources:

1. VV Liger, Yu. A. Kuritsyn, VR Mironenko, MA Bol'shov, Ya. Ya. Ponurovsky, OM Kolesnikov Measurement of the parameters of unsteady gas flows by the method of diode laser absorption spectroscopy under conditions of increased temperatures and pressures. -2018. S. 92-103
2. M.A. Bolshov, Yu.A. Kuritsyn, Yu.V. Romanovskii - Tunable diode laser spectroscopy as a technique for combustion diagnostics, pp. 45–66.
3. L.S. Rothman, I.E. Gordon, Y. Babikov, A. Barbe, D. Chris Benner, P.F. et al., The HITRAN2012 Molecular Spectroscopic Database // J.Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, 2013.130, 4-50 pp

4. Bolshov M.A., Kuritsyn Yu.A., Liger V.V., Mironenko V.R. Development of the method of absorption spectroscopy with diode lasers to determine the temperature and concentration of molecules in a remote object // Optics and Spectroscopy, vol. 110, no. 6, 2011. pp. 900–908.
5. HITRAN is an acronym for high-resolution transmission molecular absorption database [Electronic resource]. URL: https://hitran.org/
6. Roman V. Kochanov HITRAN Application Programming Interface (HAPI). Manual ver. 4.3, 14 April 2019.
7. Information system "Spectroscopy of atmospheric gases" (SPECTRA) [Electronic resource]. URL: https://spectra.iao.ru/