

Рисунок 3 – Фрактальный характер распределения количества зерен в материале мишени ZnO-5% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> по размерам: а — длине; б — ширине.

Таким образом, проведены экспериментальные исследования распределения количества зерен в материале распыляемых керамических мишеней по размерам. Исследования проводились при получении мишеней из микро-нанопорошка оксида цинка с легирующими добавками редкоземельных соединений. На основе проведенных исследований предлагается оценивать структуру распыляемых керамических мишеней по фрактальным параметрам. Фрактальная геометрия структуры керамических распыляемых мишеней анализируется по ниспадающим ветвям гистограмм распределения размеров зерен и пор в материале мишени. Фрактальный параметр в данном случае представляется как количественная характеристика структуры распыляемой мишени, наследовавшая свойства всех предшествующих этапов технологического процесса получения готового изделия.

## ЛАЗЕРНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ НАГРЕТОЙ ГАЗОВОЙ СМЕСИ CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>

<sup>1</sup>Аршинов К.И., <sup>2</sup>Невдах В.В., <sup>1</sup>Крапивная О.Н., <sup>1</sup>Линевич А.В., <sup>1</sup>Шедьков В.В.

<sup>1</sup>Институт технической акустики НАН Беларуси, Витебск, Беларусь,  
itaaki@yandex.ru

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь,  
v.v.nev@bk.ru

### Введение

Поиск новых способов сгорания топлив, ориентированных на защиту окружающей среды и экономию топливных ресурсов, всегда являлся актуальной задачей. Современные методы исследования горения относятся к области экспериментального, математического и численного моделирования данного процесса. Для оценки применимости новых моделей горения, необходимы экспериментальные данные о температуре, скорости горения и концентрации продуктов сгорания. Для анализа продуктов сгорания топлив можно использовать газоанализаторы, однако отбор проб газоанализаторами достаточно трудоемок и инерционен, что препятствует широкому использованию газоанализаторов для оптимизации процессов горения. Более перспективным средством контроля процесса горения представляется оптический мониторинг. Среди оптических методов особого внимания, как наиболее простой в реализации, заслуживает метод многочастотной лазерной диагностики. Применение данного метода для диагностики газовых сред, содержащих CO<sub>2</sub>, стало возможным после разработки стабилизированных по частоте перестраиваемых CO<sub>2</sub>-лазеров и полупроводниковых диодных лазеров, что позволило проводить прецизионные измерения коэффициентов усиления/поглощения на различных колебательно-вращательных линиях. Первоначально многочастотная лазерная диагностика использовалась для исследования колебательно неравновесных

молекулярных газовых сред [1], но в последующих работах [2,3] показана возможность использования этого метода для исследований колебательно равновесных газовых сред, содержащих  $\text{CO}_2$ , к которым и относятся газообразные продукты сгорания топлив. В этом случае, имеется возможность одновременно определить температуру и концентрацию диоксида углерода из измеренного спектрального распределения коэффициента поглощения. Цель настоящей работы состоит в экспериментальной проверке метода многочастотного лазерного зондирования на примере зондирования колебательно равновесной газовой смеси  $\text{CO}_2:\text{N}_2$ .

### Методика

Рассматриваемый метод основан на измерении спектрального распределения ненасыщенного коэффициента поглощения (КП) в газовой смеси, содержащей диоксид углерода, на частотах генерации  $\text{CO}_2$ -лазера, перестраиваемого по линиям основных лазерных переходов  $00^0_1-[10^0_0,02^0_0]_{\text{л.п.}}$ . При использовании в качестве источника зондирующего излучения стабилизированного по максимуму контура усиления  $\text{CO}_2$ -лазера низкого давления и давлениях исследуемых смесей до одной атмосферы можно с достаточно высокой точностью считать, что измерения КП осуществляются на центральных частотах линий поглощения  $\nu_{0J}$ . Выражение для КП в центре рассматриваемых линий может быть представлено в виде [4]

$$\alpha_{nm}(\nu_0) = N_{\text{CO}_2} A_{mn} \frac{c^2}{8\pi\nu_0^2} g_m Q_V^{-1} Q_{Rm}^{-1} \left( e^{-\frac{E_n}{kT}} - e^{-\frac{E_m}{kT}} \right) F(\nu_0), \quad (1)$$

где  $N_{\text{CO}_2}$  плотность молекул  $\text{CO}_2$ ;  $A_{mn}$  вероятность спонтанного излучения;  $Q_{Rm} = kT/2hcB_m$  и  $Q_V = [1 - \exp(-\frac{1997K}{T})]^{-1} [1 - \exp(-\frac{960K}{T})]^{-2} [1 - \exp(-\frac{3380K}{T})]^{-1}$  вращательная и колебательная статистические суммы молекулы  $\text{CO}_2$ ;  $E_n = E_{100} + B_n J(J+1)$  и  $E_m = E_{001} + B_m C_1(J)$  энергии рассматриваемых уровней с  $E_{100} = 1388.3 \text{ см}^{-1}$  и  $E_{001} = 2349.3 \text{ см}^{-1}$ ;  $J$  вращательное квантовое число уровня  $10^0_0$ ;  $B_n = 0.39018783 \text{ см}^{-1}$  и  $B_m = 0.38714044 \text{ см}^{-1}$  вращательные константы;  $g_m = 2J-1$  вырождение уровня  $m$  и  $C_1 = J(J-1)$  для линий  $P$ -ветви и  $g_m = 2J+3$ ,  $C_1 = (J+1)(J+2)$  для линий  $R$ -ветви;  $F(\nu_0)$  форм-фактор в центре линии поглощения.

При давлении исследуемой смеси газов более 50 Тор преобладающим механизмом уширения линий поглощения  $\text{CO}_2$  является механизм уширения давлением, и форм-фактор описывается выражением

$$F_i(\nu_0) = 2 / \pi \Delta\nu_{Li}, \quad (2)$$

где  $\Delta\nu_{Li}$  - полная ширина  $i$ -й столкновительно-уширенной линии на ее полувысоте. Для рассматриваемой газовой смеси  $\text{CO}_2:\text{N}_2$   $\Delta\nu_{Li}$  может быть представлена в виде [5]

$$\Delta\nu_{Li} = \gamma_{i\text{CO}_2} \cdot p_{\text{total}} \cdot [\xi_{\text{CO}_2} + b_{\text{N}_2} \cdot \xi_{\text{N}_2}] \cdot \sqrt{\frac{300}{T}}, \quad (3)$$

где  $\gamma_{i\text{CO}_2}$  - столкновительная ширина  $i$ -й линии, обусловленная столкновениями молекул  $\text{CO}_2$  между собой, при давлении 1 Тор и температуре 300 К или коэффициент столкновительного самоуширения для молекулы  $\text{CO}_2$  [6],  $p_{\text{total}}$  - давление смеси газов,  $\xi_{\text{CO}_2}$ ,  $\xi_{\text{N}_2}$  - доли молекул  $\text{CO}_2$  и  $\text{N}_2$  в смеси,  $b_{\text{N}_2}$  - относительный коэффициент столкновительного уширения молекул  $\text{CO}_2$  с молекулами  $\text{N}_2$ . При  $p_{\text{CO}_2}/p_{\text{total}} < 0.1$  для расчета  $\Delta\nu_{Li}$  с достаточно высокой точностью можно использовать выражение

$$\Delta\nu_{Li} \approx \gamma_{i\text{CO}_2} \cdot b_{\text{N}_2} \cdot p_{\text{total}} \cdot \sqrt{\frac{300}{T}}. \quad (4)$$

Таким образом, спектральному распределению коэффициентов поглощения соответствует система линейных относительно  $p_{CO_2}$  и нелинейных относительно  $T$  уравнений вида (1). Связь между искомыми параметрами  $\{p_{CO_2}, T\}$  и результатами измерений коэффициентов поглощения определяется фундаментальной системой уравнений:

$$\hat{\alpha}_i = \alpha_i(p_{CO_2}, T) \pm \Delta\alpha_i, \quad (5)$$

где  $\hat{\alpha}_i$  - измеренный коэффициент поглощения на  $i$ -й длине волны  $\lambda_i$ ;  $\Delta\alpha_i$  - абсолютная погрешность  $i$ -го измерения коэффициента поглощения. В системе уравнений (5) помимо  $\{p_{CO_2}, T\}$  неизвестными остаются погрешности  $\Delta\alpha_i$  и, следовательно, система всегда не определена. При экспериментальных измерениях спектрального распределения коэффициентов поглощения мы получаем систему уравнений, в которой отсутствует информация о погрешностях измерений. Для решения такой задачи необходимо проводить измерения коэффициентов поглощения на большом числе линий, получать избыточную систему уравнений, подобную системе (5), но без  $\Delta\alpha_i$ , и решать ее статистически относительно искомым неизвестных параметров  $\{p_{CO_2}, T\}$  так, чтобы минимизировать взвешенную совокупность квадратов отклонений

$$Z = \sum_{i=1}^n w_i [\hat{\alpha}_i - \alpha_i(p_{CO_2}, T)]^2, \quad (6)$$

где  $w_i$  весовой коэффициент  $i$ -го измерения.

При заданной температуре из (5) и (6) нетрудно получить выражение для давления  $p_{CO_2}$ , которое соответствует минимуму функционала  $Z$

$$p_{CO_2} = \frac{\sum_i w_i \hat{\alpha}_i \varphi_i}{\sum_i w_i \varphi_i^2}, \quad (7)$$

где  $\varphi_i = a_i(v_0)/p_{CO_2}$ .

Алгоритм расчета состоит в том, что осуществляется сканирование по температуре с соответствующим расчетом давления по (7) и минимизируется функционал  $Z$  (6). Таким образом, выбирается та совокупность параметров  $\{p_{CO_2}, T\}$ , которой соответствует минимальное значение  $Z$ . При расчетах для первой итерации весовые коэффициенты принимаются  $w_i^{(1)} = 1$ . Для  $(j+1)$ -й итерации весовые коэффициенты назначаются в виде [7]

$$w_i^{(j+1)} = \frac{1}{[\hat{\alpha}_i - \alpha_i(p_{CO_2}^j, T^j)]^2}. \quad (8)$$

### Эксперимент

На рис. 1 представлено измеренное спектральное распределение ненасыщенных коэффициентов поглощения в газовой смеси  $CO_2:N_2=1:9$  ( $p_{total} = 100$  Тор,  $T=500$  К) для линий  $P$ -ветви (а) и  $R$ -ветви (б) колебательного перехода  $10^0 0 - 00^0 1$  молекулы  $CO_2$ . Из рассмотрения были исключены спектральные линии  $P$ -ветви, которые перекрываются отдельными линиями вышележащих горячих переходов [8].

Приводимые в литературе значения коэффициентов  $b_{N_2}$ , как правило, принимаются как параметры, независимые от температуры (см., например [9]). Тот факт, что коэффициент  $b_{N_2}$  входит в (3) как константа, по существу означает признание одинакового характера уширения спектральной линии при взаимодействии молекул  $CO_2$  со столкновительными партнерами, обладающими различными свойствами ( $CO_2-CO_2$  и  $CO_2-N_2$ ), что противоречит существующим представлениям о механизмах столкновительного уширения спектральных линий. В [10] была обнаружена температурная зависимость

относительного коэффициента столкновительного уширения линии поглощения  $R22$  перехода  $10^0 0-00^0 1$  молекулы  $\text{CO}_2$  молекулами  $\text{N}_2$   $b_{\text{N}_2}$  в диапазоне температур 300 – 700 К. Было установлено, что до температуры  $\sim 500$  К коэффициент  $b_{\text{N}_2}$  остается практически неизменным, но при дальнейшем увеличении температуры наблюдается его явное увеличение. Учитывая обнаруженную закономерность, при расчетах использовалась следующая модель температурной зависимости относительных коэффициентов столкновительного уширения линий поглощения  $b_{\text{N}_2}(T, J)$

$$b_{\text{N}_2} = \begin{cases} 0.74, T < 500\text{K} \\ m, T \geq 500\text{K} \end{cases},$$

$$m = \begin{cases} 0.8, J \leq 10 \\ 0.997, 10 < J \leq 22 \\ 0.92, J > 22 \end{cases} \quad (9)$$

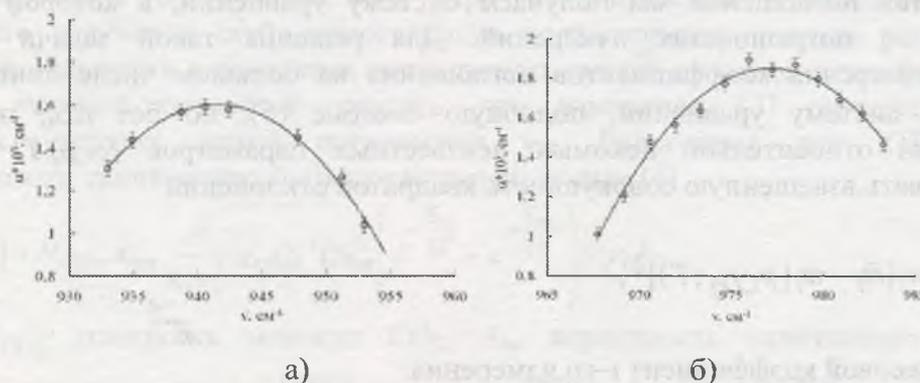


Рисунок 1 – Спектральное распределение ненасыщенных коэффициентов поглощения в газовой смеси  $\text{CO}_2:\text{N}_2=1:9$  ( $p_{\text{total}}=100$  Тор,  $T=500$  К) для линий  $P$ -ветви (а) и  $R$ -ветви (б) колебательного перехода  $10^0 0-00^0 1$  молекулы  $\text{CO}_2$

Учет данной закономерности при решении обратной задачи многочастотного зондирования позволил повысить точность определения искомых параметров:  $T=487.7$  К ( $\delta_T=2.54\%$ ),  $p_{\text{CO}_2}=11.78$  Тор ( $\delta_p=17.8\%$ ).

#### Заключение

С помощью стабилизированного по частоте перестраиваемого  $\text{CO}_2$ -лазера измерено спектральное распределение коэффициентов ненасыщенного поглощения в колебательно равновесной газовой смеси  $\text{CO}_2:\text{N}_2=1:9$  ( $p=100$  Тор,  $T=500$  К) на линиях поглощения  $P$ - и  $R$ -ветвей колебательного перехода  $10^0 0-00^0 1$  молекулы  $\text{CO}_2$ . Установлено, что точность определения парциального давления углекислого газа и температуры газовой смеси повышается, если в расчетах использовать модель температурной зависимости относительного коэффициента столкновительного уширения  $b_{\text{N}_2}(T, J)$ , основанной на измеренных значениях данного параметра.

#### Список литературы

1. Ачасов О.И., Кудрявцев Н.Н., Новиков С.С., Солоухин Р.И., Фомин Н.А. Диагностика неравновесных состояний в молекулярных лазерах. Минск: Наука и техника, 1985.- 208 с.
2. Аршинов К.И., Лешенюк Н.С., Невдах В.В. Журнал прикладной спектроскопии. - 2001. -Т. 68. -С. 723.
3. Артемьев В.В, Аршинов К.И., Лешенюк Н.С., Невдах В.В. Оптика и спектроскопия. -2004. -Т. 96. -С. 1004.
4. Ельяшевич М.А. Атомная и молекулярная спектроскопия М.:ФМЛ.-1962.- 892с.
5. Abrams R.L. Appl. Phys. Lett.1974.-V. 25.-P. 609 .
6. Невдах В.В. Квантовая электроника.-1984.-Т. 11. -С. 1622 .

7. Мудров В.И., Кушко В.Л. Методы обработки измерений. М.: Радио и связь.1983.- 304с.
8. Аршинов К.И., Аршинов М.К., Невдах В.В., Perrin M.-Y., Soufiani A., Яснов В.В. Журнал прикладной спектроскопии. -2007. –Т.74. –С. 810.
9. Rosenmann L., Hartmann J.M., Perrin M.Y., and Taine J. Applied Optics.-1988. V.27. - P. 3902.
10. Аршинов К.И., Аршинов М.К., Невдах В.В. Квантовая электроника.-2010.-V.40.- P. 629.

## ПОЛУЧЕНИЕ ЗАМАСЛИВАТЕЛЯ ДЛЯ ТЕКСТИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕГО ЭЛЮИРОВАНИЯ ВОДОЙ

Максимович Е.С., Сакевич В.Н.

*Витебский государственный технологический университет, г. Витебск, Беларусь*

В текстильном производстве используются замасливатели как в концентрированном виде, так и в виде эмульсий. Цель замасливания заключается в уменьшении электризации волокон и возможности регулирования фрикционных свойств нитей путем целенаправленного воздействия замасливателя на физико-механические характеристики, ответственные за распределение и взаимодействие замасливающих композиций с текстильным материалом [1].

Замасливатель должен равномерно покрывать поверхность пряжи и частично проникать вглубь нити, не снижать разрывной нагрузки волокна и не затруднять отбелку и крашение, легко удаляться из ткани промывкой водой без применения специальных растворителей, а материалы для приготовления замасливателей должны быть дешевыми и недефицитными, не быть токсичными и не вызывать коррозии металлических деталей текстильных машин, не застывать, не быть липкими и вязкими, не давать осадка и не сыпаться в процессе ткачества, не изменять окраску цветных основ.

Такая обработка проводится во время наматывания пряжи в бобины или во время снования, если она предназначена для основязального производства. При наматывании на бобины на нити наносится замасливатель специальным устройством. После изготовления ткани замасливатель должен быть полностью удален из волокна, так как в противном случае это может отразиться на равномерности окрашивания волокна [2]. Неверный подбор как технологических параметров эмульсирования так и самого замасливателя неизбежно приведет к браку.

Эффективна замена шлихтования эмульсированием. Выгода заключается в снижении себестоимости обработки основ в результате сокращения затрат на химические материалы и пара на 15–20 %, в повышении производительности перегонно-эмульсирующей машины по сравнению со шлихтовальной в 1,7–1,8 раза [3].

Цель настоящей работы – это создание замасливателя для нужд текстильной промышленности и способа его получения, позволяющих снизить стоимость конечного продукта, как за счет использования более дешевого, желателно местного сырья, так и за счет менее трудоемкой и энергоёмкой технологии, повышение производительности процесса, а так же расширить сырьевую базу производства.

Поставленная задача достигается за счет применения в качестве нефтепродуктов 51 – 53 масс.% нефтяного экстракта, а в качестве эмульгатора – 25 – 27 масс.% жирных кислот растительных масел и дополнительно 20 – 24 масс.% неонола. А также за счет смешивания исходных компонентов посредством ультразвуковой обработки до получения однородной массы.

Ультразвуковое воздействие инициирует реакцию между реагирующими компонентами, что позволяет получить устойчивый к расслоению в течение года и более