



# Автоматическая калибровка лазерного спектрометра для мониторинга газов: подход на основе диодно-лазерной абсорбционной спектроскопии

М.А. Терин<sup>1,2</sup>✉, А.С. Филонов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия

<sup>2</sup> ООО «БО-ЭНЕРГО», Москва, Россия

✉ kresh80@mail.ru

**цитирование** Терин М.А., Филонов А.С. Автоматическая калибровка лазерного спектрометра для мониторинга газов: подход на основе диодно-лазерной абсорбционной спектроскопии // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2026. Т. 70, № 1. С. 174–183. DOI:10.30533/GiA-2026-011.

**ключевые слова** диодно-лазерная абсорбционная спектроскопия, мониторинг газов, лазерная спектроскопия, автоматическая калибровка

**аннотация** Точность измерений концентрации газов с помощью лазерного спектрометра критически зависит от качества его калибровки. В серийном производстве спектрометров традиционные методы калибровки, требующие участия оператора, приводят к субъективным ошибкам, увеличению времени настройки и нестабильности результатов. В данной работе предложен полностью автоматизированный метод калибровки диодных лазерных абсорбционных спектрометров, исключающий влияние человеческого фактора и обеспечивающий стандартизацию процесса для массового производства. Технология основана на использовании эталонных газовых смесей с точно известными концентрациями, алгоритмов адаптивной настройки лазерных параметров и автоматизированной обработки спектральных данных. Предлагаемый метод автоматической калибровки диодных лазерных абсорбционных спектрометров позволяет стандартизировать процесс для массового производства и повысить надежность измерений для газов  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$  и  $\text{C}_2\text{H}_6$ . Экспериментальная проверка на смесях  $\text{N}_2/\text{CH}_4$  показала, что данный подход обеспечивает погрешность калибровки не более 2 %, что соответствует требованиям промышленного мониторинга. Применение метода открывает новые возможности для массового производства диодно-лазерных абсорбционных спектрометров. В статье также представлены перспективы развития технологии.

# 1 Введение

Метод диодно-лазерной абсорбционной спектроскопии (ДЛАС; *англ.* Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS) благодаря высокой чувствительности и селективности широко применяется для точного измерения концентрации газов [1]. Однако точность измерений критически зависит от качества калибровки прибора [2, 3], особенно при промышленном производстве спектрометров. Как показывают исследования, именно качество калибровки становится ключевым фактором, определяющим точность и воспроизводимость измерений в реальных условиях.

В промышленном мониторинге газовых смесей предъявляются повышенные требования к точности и воспроизводимости измерений. Особую сложность представляет калибровка измерительных приборов на этапе их производства, где традиционные ручные методы демонстрируют ряд существенных ограничений, таких как:

- субъективные ошибки и высокая вариабельность из-за различий между приборами, человеческого фактора и влияния внешних условий [4];
- значительные временные затраты, снижающие производительность серийного производства;
- нестабильность результатов в эксплуатации из-за возможных отклонений при первоначальной калибровке.

Современные системы калибровки диодно-лазерных абсорбционных спектрометров можно условно разделить на три категории: ручные, полуавтоматические и полностью автоматические.

Полуавтоматические системы, как правило, требуют ручной настройки или валидации. Например, в работе, посвященной измерению  $C_2H_4$  в условиях шахт [5], для калибровки использовался высокоточный автоматический дозатор газов Environics2000. Однако, несмотря на автоматическую подачу газа, конечная калибровка концентрации выполнялась с помощью многофакторного алгоритма, который требовал ручной валидации и подбора параметров для компенсации перекрестных помех между спектральными линиями  $CH_4$  и  $C_2H_4$ . В итоге максимальная погрешность измерения составила 2,4 % [5].

В работе по многокомпонентному измерению CO и  $CO_2$  в нефтехимии [6] рассматриваются алгоритмы частичной регрессии наименьших квадратов, которые требуют создания обучающих выборок на основе ручных экспериментальных данных. Это приводит к субъективным ошибкам и ограничениям в применении газов (используются только те, для которых были проведены калибровочные эксперименты) [6]. Как отмечается в статье [7], проблема перекрестных помех при многокомпонентном TDLAS-детектировании остается критической, алгоритмические методы коррекции не устраняют интерференцию на корневом уровне, что подтверждает необходимость точного приготовления калибровочных смесей.

Эти недостатки особенно критичны в задачах промышленного мониторинга многокомпонентных смесей, где требуются высокая скорость измерений, минимальное вмешательство человека и одновременная калибровка для нескольких газов.

Примером полностью автоматического подхода является работа, в которой предложена онлайн-самокалибровка TDLAS-анализатора с использованием эталонной газовой ячейки, автоматически компенсирующей влияние температуры и давления [8]. Однако данное решение ориентировано на мониторинг одного газа и не обеспечивает стандартизацию калибровки для многокомпонентных смесей в серийном производстве.

Современные полностью автоматические системы калибровки ДЛАС демонстрируют значительный прогресс, в том числе за счет внедрения алгоритмов машинного обучения. Так, в работе [9] предложено использовать регрессию на основе гауссовских процессов для прямого определения концентраций из спектров, что позволяет обойти сложный и трудоемкий процесс поточечной аппроксимации спектральных линий. Китайским исследователям с помощью нейросетевой модели при анализе  $CO_2$  методом TDLAS-анализа удалось достичь

коэффициента детерминации 0,9884 [10]. Применение физико-информированных нейронных сетей для решения нелинейных задач лазерной абсорбционной спектроскопии также продемонстрировано в статье [11], где нейросетевая модель использовалась для восстановления концентрации  $\text{CO}_2$  по TDLAS-спектрам. В работе [12] разработан метод томографической абсорбционной спектроскопии с использованием обучаемого метода восстановления спектра поглощения, который позволил снизить погрешность измерения температуры с 4,6 до 0,9 % в лабораторных условиях при измерении в статической кювете.

Однако рассмотренные подходы имеют такие критические для массового внедрения ограничения, как:

- высокая стоимость и сложность реализации алгоритмов машинного обучения;
- потребность в больших объемах обучающих данных;
- избыточность функционала для большинства промышленных задач, где требуется стандартизированный и воспроизводимый процесс.

Был разработан полностью автоматизированный метод калибровки, основанный на применении газосмесителя MXM (Alicat Scientific), устраняющий влияние человеческого фактора и обеспечивающий стандартизацию процесса для серийного производства с использованием:

- 1) эталонов газовых смесей с точно известными концентрациями [13];
- 2) алгоритма автоматического смешивания газовой смеси;
- 3) алгоритма адаптивной настройки лазерных параметров;
- 4) автоматизированной обработки спектральных данных.

В отличие от других автоматизированных систем, наша разработана на базе прибора MXM, который имеет меньшую стоимость, может работать в любых условиях, способен создавать смесь из четырех газов, при этом погрешность системы составляет не более 2 %.

## 2 Материалы и методы

### 2.1 Принцип работы диодно-лазерного абсорбционного спектрометра

Сущность метода ДЛАС состоит в том, что лазерный луч настраивается на определенную длину волны, которая соответствует характерным спектрам поглощения газа. Когда лазерный свет проходит через образец, молекулы газа могут поглощать этот свет, что приводит к снижению его интенсивности. Изменение интенсивности света на разных длинах волн позволяет определить концентрацию газа.

В лазерных спектрометрах используются диодные лазеры, которые могут работать в специфическом диапазоне длин волн. Данные лазеры способны настраиваться на определенные длины волн, которые соответствуют молекулярным спектрам поглощения искомого газа. Газовый образец помещается в оптическую ячейку, через которую проходит лазерный луч. В качестве газового образца можно использовать атмосферу, выбросы из промышленных процессов или любой другой газ. Каждое вещество имеет уникальный спектр поглощения, что позволяет различать газы по их молекулярным характеристикам. Лазер настраивается на длину волны, соответствующую поглощению целевого газа. Постепенно изменяя длину волны (например, с помощью перестройки частоты), можно выявить, на каких длинах волн происходит поглощение.

Датчик (например, фотодетектор) принимает лазерный свет после прохождения через газ. Сравнивается интенсивность света до и после прохождения через образец. Падение интенсивности связано с поглощением света газом. Значения поглощенной интенсивности на разных длинах волн записываются и анализируются для создания спектра поглощения.

Изменения в интенсивности света на различных длинах волн позволяют определить концентрацию газа. ДЛАС может использоваться в различных условиях окружающей среды, в том числе при низких и высоких значениях температуры и давления.

Измерение концентрации газов в лазерной ячейке (рис. 1) проводится по закону Бугера — Ламберта — Бера. Согласно этому закону, интенсивность прошедшего излучения можно определить по следующей формуле:

$$I(v) = I_0(v)e^{-K(v)L},$$

где  $I_0(v)$  — интенсивность излучения до попадания в ячейку;  
 $K(v)$  — частотно-зависимый коэффициент поглощения;  
 $L$  — длина оптического пути.

Частотно-зависимый коэффициент поглощения включает в себя коэффициент поглощения  $\alpha(v)$  и концентрацию вещества  $C$ :

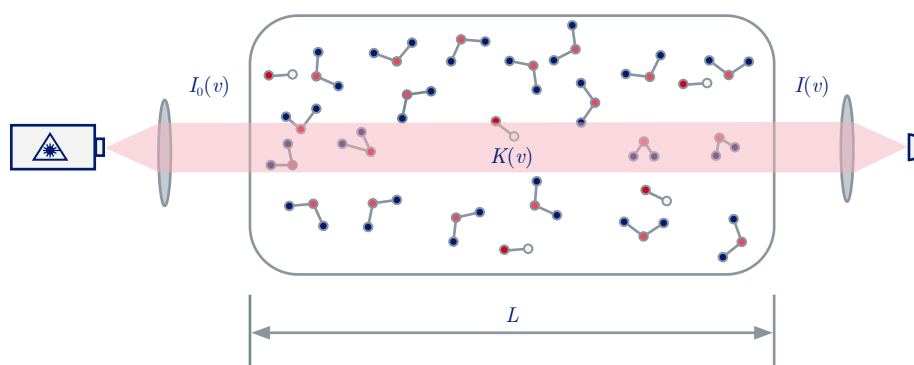
$$K(v) = \alpha(v) \times C.$$

**Рис. 1**

Измерение концентрации газов в лазерной ячейке

**Fig. 1**

Measurement of gas concentration in a laser cell



Закон Бугера — Ламберта — Бера можно выразить через поглощение и оптическую плотность:

$$K(v) \times L = S_0(v) \times C \times N \times L = \ln \left( \frac{I_0(v)}{I(v)} \right),$$

где  $S_0(v)$  — интенсивность линии поглощения;  
 $N$  — число Лошмидта.

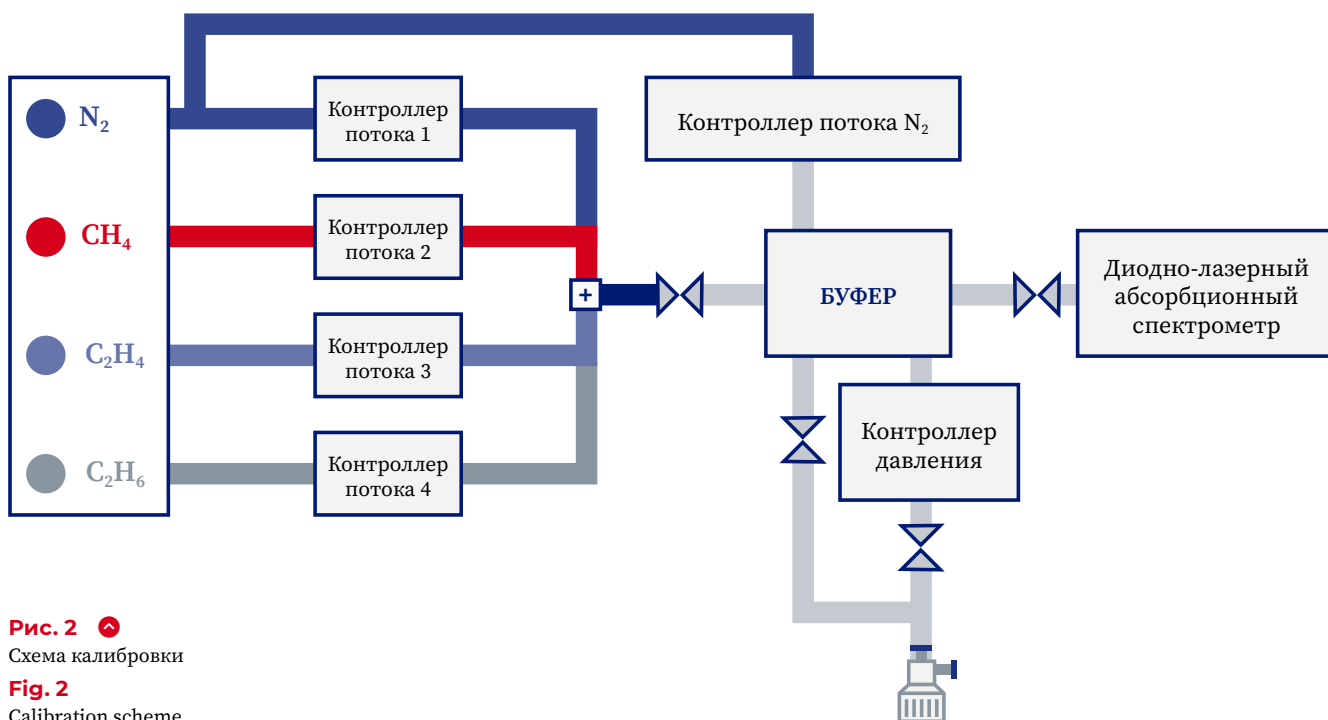
Выбрав параметр интенсивности линии поглощения через базу данных HITRAN<sup>1</sup>, можно определить концентрацию газа в лазерной ячейке.

## 2.2 Экспериментальная установка

В качестве спектрометра для калибровки использовался лазерный стенд, входящий в систему мониторинга и диагностики трансформаторного оборудования «Звезда»<sup>2</sup>, разработанный компанией «БО-ЭНЕРГО». Данный спектрометр предназначен для детектирования в масле трансформаторов концентраций таких газов, как CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> и C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>. По концентрации газов в масле можно определить текущее состояние трансформатора и при необходимости выполнить ремонт.

1 The HITRAN Database. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://hitran.org> (дата обращения: 20.06.2025).

2 Автоматизированная система мониторинга и диагностики трансформаторного оборудования (АСМД) «Звезда» / ООО «БО-ЭНЕРГО.АСТС». [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.bo-energo.ru/equipment/dlya-silovykh-transformatorov/nepreryvnyy-monitoring-osnovnykh-parametrov/avtomatizirovannaya-sistema-monitoringa-i-dagnostiki-transformatornogo-oborudovaniya-asmd-zvezda/> (дата обращения: 17.06.2025).



Лазерная ячейка состоит из двух сферических зеркал с алюминиевым покрытием по маске. Между ними 37 раз отражается лазерное излучение, которое заводится через оптическое волокно. Лазерная ячейка заполняется газом через газовый штуцер, а давление определяется с помощью датчика. Волоконный коллиматор преобразует лазерное излучение из волокна в параллельный луч с минимальной расходимостью.

Стенд калибровки (рис. 2) представляет собой газовые баллоны, подключенные к контроллерам потоков. Данные контроллеры управляются с помощью МХМ, который предоставляет на выходе смешанный газовый поток. Ошибка смешивания МХМ составляет не более 0,5 %. Помимо детектируемых газов используется газ  $N_2$ , который не поглощается на длинах волн, используемых в выбранном спектрометре.

Основная задача калибровки — задать точную концентрацию в лазерной ячейке и откалибровать спектрометр по заданным показателям. Была разработана программа на языке программирования Python, которая осуществляет управление всеми клапанами, датчиками, прибором смешения, спектрометром и контроллерами в автоматическом режиме.

Первоначальный этап работы заключается в промывке всего стенда калибровки азотом. После установления требуемого давления газ откачивается до вакуума. После промывания в буфере стенда создается газовая смесь. Затем открывается клапан между лазерной ячейкой и буфером, и часть газовой смеси переходит в лазерную ячейку. С помощью датчика давления в лазерной ячейке устанавливается необходимое давление, включается требуемый лазер, и начинается измерение спектра.

В качестве экспериментального спектрометра выступал откалиброванный прибор «Звезда» для определения точности смешения газовой смеси. Измерения проходили с использованием смеси газов  $N_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_6$ . В программу загружался список концентраций и выполнялись измерения. Результаты измерений приведены в табл. 1–2.

Экспериментальная проверка на смесях  $N_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_6$  подтвердила стабильность работы метода при различных значениях давления (50–200 гПа). Наибольшая точность достигнута при низких значениях (погрешность  $\leq 0,75\%$ ), что связано с уменьшением эффекта уширения спектральных линий.

**Таблица 1** ➤

Результаты измерений смеси газов  $N_2$  и  $CH_4$

**Table 1**

Results of measurements of  $N_2$  and  $CH_4$  gas mixture

| Давление,<br>гПа | Концентрация, млн <sup>-1</sup> |                 |                |                 | Погрешность,<br>% |
|------------------|---------------------------------|-----------------|----------------|-----------------|-------------------|
|                  | заданная                        |                 | измеренная     |                 |                   |
|                  | N <sub>2</sub>                  | CH <sub>4</sub> | N <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> |                   |
| 200              | 999 800                         | 200             | 999 803        | 197             | 1,50              |
| 100              | 999 800                         | 200             | 999 802        | 198             | 1,00              |
| 50               | 999 800                         | 200             | 999 799        | 201             | 0,50              |
| 200              | 999 500                         | 500             | 999 509        | 491             | 1,80              |
| 100              | 999 500                         | 500             | 999 507        | 493             | 1,40              |
| 50               | 999 500                         | 500             | 999 495        | 505             | 1,00              |
| 200              | 999 000                         | 1000            | 999 018        | 982             | 1,80              |
| 100              | 999 000                         | 1000            | 999 009        | 991             | 0,90              |
| 50               | 999 000                         | 1000            | 999 002        | 998             | 0,20              |
| 200              | 998 000                         | 2000            | 998 028        | 1972            | 1,40              |
| 100              | 998 000                         | 2000            | 998 019        | 1981            | 0,95              |
| 50               | 998 000                         | 2000            | 998 011        | 1989            | 0,55              |
| 200              | 995 000                         | 5000            | 995 089        | 4911            | 1,78              |
| 100              | 995 000                         | 5000            | 995 069        | 4931            | 1,38              |
| 50               | 995 000                         | 5000            | 995 031        | 4969            | 0,62              |
| 200              | 990 000                         | 10 000          | 990 012        | 9988            | 0,12              |
| 100              | 990 000                         | 10 000          | 989 999        | 10 001          | 0,01              |
| 50               | 990 000                         | 10 000          | 989 925        | 10 075          | 0,75              |

**Таблица 2** ➤

Результаты измерений смеси газов  $N_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_6$

**Table 2**

Results of measurements of the mixture of gases  $N_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_6$

| Давление,<br>гПа | Концентрация, млн <sup>-1</sup> |                 |                               |                               |                |                 |                               |                               | Погрешность,<br>% |
|------------------|---------------------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------|
|                  | заданная                        |                 |                               |                               | измеренная     |                 |                               |                               |                   |
|                  | N <sub>2</sub>                  | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | N <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> |                   |
| 200              | 990 797                         | 9000            | 203                           | 0                             | 990 858        | 8947            | 195                           | 0                             | 0,66              |
| 100              | 990 797                         | 9000            | 203                           | 0                             | 990 841        | 8961            | 198                           | 0                             | 0,48              |
| 50               | 990 797                         | 9000            | 203                           | 0                             | 990 774        | 9021            | 205                           | 0                             | 0,25              |
| 200              | 989 797                         | 0               | 203                           | 10000                         | 989 912        | 0               | 196                           | 9892                          | 1,13              |
| 100              | 989 797                         | 0               | 203                           | 10000                         | 989 874        | 0               | 197                           | 9929                          | 0,75              |
| 50               | 989 797                         | 0               | 203                           | 10000                         | 989 868        | 0               | 197                           | 9935                          | 0,70              |
| 200              | 990 799                         | 9000            | 0                             | 201                           | 990 933        | 8872            | 0                             | 195                           | 1,46              |
| 100              | 990 799                         | 9000            | 0                             | 201                           | 990 883        | 8920            | 0                             | 197                           | 0,91              |
| 50               | 990 799                         | 9000            | 0                             | 201                           | 990 874        | 8918            | 0                             | 208                           | 0,82              |
| 200              | 989 799                         | 0               | 10000                         | 201                           | 989 951        | 0               | 9856                          | 193                           | 1,49              |
| 100              | 989 799                         | 0               | 10000                         | 201                           | 989 861        | 0               | 9941                          | 198                           | 0,61              |
| 50               | 989 799                         | 0               | 10000                         | 201                           | 989 866        | 0               | 9930                          | 204                           | 0,66              |

### 3 Результаты и обсуждение

В данной работе предложен полностью автоматизированный метод калибровки диодно-лазерных абсорбционных спектрометров, устраняющий влияние человеческого фактора и обеспечивающий стандартизацию процесса для серийного производства. Разработанный подход основан на использовании эталонных

газовых смесей, алгоритмов адаптивной настройки лазерных параметров и автоматизированной обработки спектральных данных.

Предлагаемый метод демонстрирует значительные преимущества по сравнению с существующими аналогами, что подтверждается экспериментальными данными. Так, в работе [14] разработана установка для онлайн-детектирования шести газов ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ) в трансформаторном масле, однако калибровочные эксперименты выполнялись в лабораторных условиях вручную. В отличие от данного подхода, предложенный метод полностью автоматизирует процесс калибровки, а полученная погрешность калибровки  $< 2\%$  является оптимальным балансом между точностью и экономической эффективностью, что особенно важно для промышленного внедрения.

Автоматизация калибровки сокращает время настройки прибора, что критично для серийного производства спектрометров и экспресс-диагностики в энергетике.

Метод автоматической калибровки, как и подход, предложенный в работе [15], направлен на устранение этапа ручной калибровки и повышение точности. Если рассмотренное выше решение фокусируется на аппаратно-алгоритмической автоматизации для промышленных спектрометров, то в статье [15] демонстрируется принципиально иной путь — интеграция диодно-лазерной абсорбционной спектроскопии с методом из другой научной дисциплины для создания абсолютно нового подхода. Оба способа подчеркивают, что будущее диодно-лазерной абсорбционной спектроскопии связано с междисциплинарной интеграцией и полной автоматизацией измерительных процессов.

## 4 Выводы

Предложенный в данной статье метод открывает новые возможности для массового производства диодно-лазерных абсорбционных спектрометров, сочетая точность, сопоставимую с лабораторными системами, и экономичность, критически важную для промышленности. При дальнейшем развитии технологии рекомендуется добавление других газов для смешивания [ $\text{CH}_3\text{OH}$ ,  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ].

### библиография

1. Dai J., Luo B., Shen X., et al. A Review of Optical Gas Sensing Technology for Dissolved Gas Analysis in Transformer Oil // *Frontiers in Physics*. 2025. Vol. 13. P. 1547563. DOI:10.3389/fphy.2025.1547563.
2. Gazizov I., Pinto D., Moser H., et al. Absorption and Dispersion: In Search of a Versatile Spectroscopic Technique // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2025. Vol. 436. P. 137688. DOI:10.1016/j.snb.2025.137688.
3. Shen X., Hu L., Gao Y., et al. Monitoring of Multi-component Gas Concentration in Coal Mine Based on TDLAS Technology (Invited) // *Acta Photonica Sinica*. 2024. Vol. 53. Iss. 10. P. 1053410. DOI:10.3788/gzxb20245310.1053410.
4. Zhang Y., Shao L., Feng S., et al. Development of Field-Deployable TDLAS Analyzer for High Precision Measurements of  $\text{CO}_2$  and  $\text{H}_2\text{O}$  Flux // *Measurement*. 2026. Vol. 266. P. 120516. DOI:10.1016/j.measurement.2026.120516.
5. Wang W.F., Yang B., Liu H.F., et al. A Multiline Fitting Method for Measuring Ethylene Concentration Based on WMS-2f/1f // *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13. P. 15302. DOI:10.1038/s41598-023-42398-2.
6. Ji W., Lü X., Hu W., et al. Application of TDLAS Technology to Multicomponent Detection in Olefin Production Process // *Optics and Precision Engineering*. 2018. Vol. 26. Iss. 8. P. 1837–1845. DOI:10.3788/OPE.20182608.1837.
7. Wang L., Zhang T., Zhou Y., et al. Cross-Interference Correction for Multi-gas TDLAS Detection // *Proceedings of SPIE – Advanced Fiber Laser Conference (AFL2023)*. Vol. 13104. Shenzhen, China, 2024. P. 131042P. DOI:10.1117/12.3023160.
8. Zhang J., Zhu Y., Chen J.Q., et al. Study on Online Self-Calibration Technique for Trace Gas Analyzer Based on Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy // *Spectroscopy and Spectral Analysis*. 2010. Vol. 30. Iss. 4. P. 1030–1034. DOI:10.3964/j.issn.1000-0593(2010)04-1030-05.

9. Wang W., Wang Z., Chao X. Gaussian Process Regression for Direct Laser Absorption Spectroscopy in Complex Combustion Environments // Optics Express. 2021. Vol. 29. Iss. 12. P. 17926–17939. DOI:10.1364/OE.425662.
10. Wang Y.S., Chen S.X., Kong Q.M., et al. Research on CO Concentration Detection Based on Deep Learning and TDLAS Technology // Optics and Lasers in Engineering. 2024. Vol. 181. P. 108420. DOI:10.1016/j.optlaseng.2024.108420.
11. Li H., Ren T., Zhao C. A Physics-Informed Neural Network for Non-Linear Laser Absorption Tomography // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2025. Vol. 330. P. 109229. DOI:10.1016/j.jqsrt.2024.109229.
12. Wang R., Yu P., Huang T., et al. Measurement of Engine Exhaust Plume Temperature and Concentration Distributions with Tomographic Absorption Spectroscopy and Learning-Based Absorbance Recovery // Fuel. 2024. Vol. 377. P. 132775. DOI:10.1016/j.fuel.2024.132775.
13. Tu R., Gu J., Zeng Y., et al. Development and Validation of a Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy System for Hot Gas Flow and Small-Scale Flame Measurement // Sensors. 2022. Vol. 22. Iss. 17. P. 6707. DOI:10.3390/s22176707.
14. Chen Y., Wang Z., Li Z., et al. Development of an Online Detection Setup for Dissolved Gas in Transformer Insulating Oil // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. Iss. 24. P. 12149. DOI:10.3390/app11241249.
15. Lu J., Shen C., Zhou Z., et al. A Calibration-Free, Non-Invasive, and Accurate Total Viable Count Detection Method Based on Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy Combined with Most Probable Number Counting // Optics and Lasers in Engineering. 2024. Vol. 173. P. 107899. DOI:10.1016/j.optlaseng.2023.107899.

**авторы****Терин Михаил Алексеевич**

ООО «БО-ЭНЕРГО», Москва, Россия;

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»  
(МИИГАиК), Москва, Россия

кафедра прикладной оптики, факультет оптического приборостроения

**Филонов Александр Сергеевич**

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»  
(МИИГАиК), Москва, Россия

кафедра прикладной оптики, факультет оптического приборостроения  
канд. техн. наук, доцент

Поступила 24.06.2025. Принята к публикации 20.02.2026. Опубликовано 27.02.2026.



# Automatic Calibration of Laser Spectrometer for Gas Monitoring: Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy Based Approach

Mikhail A. Terin<sup>1,2</sup>✉, Aleksander S. Filonov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia

<sup>2</sup> BO-ENERGO LLC, Moscow, Russia

✉ kresh80@mail.ru

**citation** Terin MA, Filonov AS. Automatic Calibration of Laser Spectrometer for Gas Monitoring: Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy Based Approach. *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2026;70(1): 174–183. DOI:10.30533/GiA-2026-011.

**keywords** tunable diode laser absorption spectroscopy analysis, gas monitoring, laser spectroscopy, automatic calibration

**abstract** The accuracy of gas concentration measurements using a laser spectrometer critically depends on the quality of its calibration. In mass production of spectrometers, traditional calibration methods that require operator intervention lead to subjective errors, increased setup time, and instability of results. In this paper, a fully automated method for calibrating tunable diode laser absorption spectrometers is proposed, eliminating the influence of the human factor and ensuring standardization of the process for mass production. The method is based on the use of reference gas mixtures with precisely known concentrations, algorithms for adaptive adjustment of laser parameters, and automated processing of spectral data. The proposed method for automatic calibration of tunable diode laser absorption spectrometers allows standardizing the process for mass production and increasing the reliability of measurements for CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, and C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> gases. Experimental testing on N<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> mixtures showed that the proposed approach provides a calibration error of no more than 2 %, which meets the requirements of industrial monitoring. The method opens up new opportunities for the mass production of diode laser absorption spectrometers. The article also presents the prospects for the development of technology.

**references** 1. Dai J, Luo B, Shen X, et al. A Review of Optical Gas Sensing Technology for Dissolved Gas Analysis in Transformer Oil. *Frontiers in Physics*. 2025;13: 1547563. DOI:10.3389/fphy.2025.1547563.

2. Gazizov I, Pinto D, Moser H, et al. Absorption and Dispersion: In Search of a Versatile Spectroscopic Technique. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2025;436: 137688. DOI:10.1016/j.snb.2025.137688.
3. Shen X, Hu L, Gao Y, et al. Monitoring of Multi-component Gas Concentration in Coal Mine Based on TDLAS Technology (Invited). *Acta Photonica Sinica*. 2024;53(10): 1053410. DOI:10.3788/gzxb20245310.1053410.
4. Zhang Y, Shao L, Feng S, et al. Development of Field-Deployable TDLAS Analyzer for High Precision Measurements of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O Flux. *Measurement*. 2026;266: 120516. DOI:10.1016/j.measurement.2026.120516.
5. Wang WF, Yang B, Liu HF, et al. A Multiline Fitting Method for Measuring Ethylene Concentration Based on WMS-2f/1f. *Scientific Reports*. 2023;13: 15302. DOI:10.1038/s41598-023-42398-2.
6. Ji W, Lü X, Hu W, et al. Application of TDLAS Technology to Multicomponent Detection in Olefin Production Process. *Optics and Precision Engineering*. 2018;26(8): 1837–1845. DOI:10.3788/OPE.20182608.1837.
7. Wang L, Zhang T, Zhou Y, et al. Cross-Interference Correction for Multi-gas TDLAS Detection. *Proceedings of SPIE – Advanced Fiber Laser Conference (AFL2023)*. Vol. 13104. Shenzhen, China, 2024. P. 131042P. DOI:10.1117/12.3023160.
8. Zhang J, Zhu Y, Chen JQ, et al. Study on Online Self-Calibration Technique for Trace Gas Analyzer Based on Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy. *Spectroscopy and Spectral Analysis*. 2010;30(4): 1030–1034. DOI:10.3964/j.issn.1000-0593(2010)04-1030-05.
9. Wang W, Wang Z, Chao X. Gaussian Process Regression for Direct Laser Absorption Spectroscopy in Complex Combustion Environments. *Optics Express*. 2021;29(12): 17926–17939. DOI:10.1364/OE.425662.
10. Wang YS, Chen SX, Kong QM, et al. Research on CO Concentration Detection Based on Deep Learning and TDLAS Technology. *Optics and Lasers in Engineering*. 2024;181: 108420. DOI:10.1016/j.optlaseng.2024.108420.
11. Li H, Ren T, Zhao C. A Physics-Informed Neural Network for Non-Linear Laser Absorption Tomography. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2025;330: 109229. DOI:10.1016/j.jqsrt.2024.109229.
12. Wang R, Yu P, Huang T, et al. Measurement of Engine Exhaust Plume Temperature and Concentration Distributions with Tomographic Absorption Spectroscopy and Learning-Based Absorbance Recovery. *Fuel*. 2024;377: 132775. DOI:10.1016/j.fuel.2024.132775.
13. Tu R, Gu J, Zeng Y, et al. Development and Validation of a Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy System for Hot Gas Flow and Small-Scale Flame Measurement. *Sensors*. 2022;22(17): 6707. DOI:10.3390/s22176707.
14. Chen Y, Wang Z, Li Z, et al. Development of an Online Detection Setup for Dissolved Gas in Transformer Insulating Oil. *Applied Sciences*. 2021;11(24): 12149. DOI:10.3390/app11241249.
15. Lu J, Shen C, Zhou Z, et al. A Calibration-Free, Non-Invasive, and Accurate Total Viable Count Detection Method Based on Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy Combined with Most Probable Number Counting. *Optics and Lasers in Engineering*. 2024;173: 107899. DOI:10.1016/j.optlaseng.2023.107899.

**authors****Mikhail A. Terin**

BO-ENERGO LLC, Moscow, Russia;  
 Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia  
 Department of Applied Optics, Faculty of Optical Instrumentation

**Aleksander S. Filonov**

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia  
 Department of Applied Optics, Faculty of Optical Instrumentation  
 PhD in Engineering, Associate Professor

Submitted: June 24, 2025. Accepted: February 20, 2026. Published: February 27, 2026.