

ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 622.279:543.27:621.384.3

DOI: 10.34680/2076-8052.2025.3(141).455-467

Поступила в редакцию / Received 05.05.2025

ГРНТИ 52.47.25+31.19.29+47.55.31

Специальность ВАК 2.2.13.

Принята к публикации / Accepted 28.09.2025

Научная статья

РАЗРАБОТКА МЕТОДА АНАЛИЗА ДАННЫХ В TDLAS-ГАЗОАНАЛИЗАТОРЕ

Хаджийская Е. Ю., Покровская М. В.

МИРЭА – Российский технологический университет (Москва, Россия)

Аннотация. В статье рассматривается разработка метода анализа данных для газоанализатора, основанного на методе перестраиваемой диодно-лазерной абсорбционной спектроскопии, предназначенного для высокоточного измерения влажности в природном газе. Проблема точного контроля содержания водяных паров в газовой промышленности обусловлена рисками коррозии, образования кристаллогидратов и отказов оборудования, особенно при изменении термодинамических условий. Среди существующих методов измерения влажности метод перестраиваемой диодно-лазерной абсорбционной спектроскопии выделяется высокой чувствительностью, стабильностью и минимальной зависимостью от давления и температуры. В статье подробно описана структурная схема работы анализатора, основанного на методе перестраиваемой диодно-лазерной абсорбционной спектроскопии, включающая аппаратную и программную части. Аппаратная часть охватывает лазерный модуль, аналитический, реперный и базовый каналы, а также датчики давления и температуры. Программный блок включает алгоритмы вырезания спектральных участков, логарифмирования, нормализации и сопоставления с базой данных HITRAN. Особое внимание уделено методам коррекции спектральных помех, возникающих от примесей, таких как метан и углекислый газ. Представленный метод исключает необходимость прямого контакта чувствительных элементов с газовой смесью, снижая эксплуатационные затраты и обеспечивая устойчивую и точную работу системы даже при низкой концентрации влаги.

Ключевые слова: природный газ, влажность, диодная лазерная спектроскопия, анализатор влажности, обработка результатов

Для цитирования: Хаджийская Е. Ю., Покровская М. В. Разработка метода анализа данных в TDLAS-газоанализаторе // Вестник НовГУ. 2025. 3 (141). 455–467. DOI: 10.34680/2076-8052.2025.3(141).455-467

Research Article

DEVELOPMENT OF A DATA ANALYSIS METHOD IN A TDLAS GAS ANALYZER

Khadzhiyskaya E. Yu., Pokrovskaya M. V.

MIREA – Russian technological university (Moscow, Russia)

Abstract. In this article we discuss the development of a data analysis method for a gas analyzer based on tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS), designed for high-precision measurement of moisture in natural gas. The problem of accurately monitoring water vapor content in the gas industry is driven by the risks of corrosion, hydrate formation, and equipment failures, especially under changing thermodynamic conditions. Among existing moisture measurement methods, tunable diode laser absorption spectroscopy stands out for its high sensitivity, stability, and minimal dependence on pressure and temperature. The article provides a detailed description of the structural diagram of the analyzer based on TDLAS, which includes both hardware and software components. The hardware part covers the laser module, analytical, reference, and baseline channels, as well as pressure and temperature sensors. The software block includes algorithms for spectral segment extraction, logarithmization, normalization, and comparison with the HITRAN database. Special attention is given to methods of correcting spectral interferences caused by impurities such as methane and carbon dioxide. The proposed method eliminates

the need for direct contact of sensitive elements with the gas mixture, reducing operational costs and ensuring stable and accurate system performance even at low moisture concentrations.

Keywords: *natural gas, moisture, diode laser spectroscopy, moisture analyzer, data processing*

For citation: Khadziyskaya E. Yu., Pokrovskaya M. V. Development of a data analysis method in a TDLAS gas analyzer // Vestnik NovSU. 3 (141). 455–467. DOI: 10.34680/2076-8052.2025.3(141).455-467

Введение

Влажность природного газа является одним из важнейших параметров при его добыче из скважины, технологической переработке и транспортировке под давлением по магистральным трубопроводам.

Влажность необходимо измерять с высокой точностью. Даже небольшое количество H_2O в газе может привести к серьезным последствиям (коррозия, ледяные пробки, рост кристаллогидратов – в результате выход из строя оборудования). Также при изменении термодинамических условий влага имеет свойство осаждаться на стенках трубопровода.

Процессы осушки являются весьма дорогостоящими процедурами, проводить их без точного определения влажности экономически невыгодно.

В газовой промышленности используются различные гидрометры. Отличия в физическом принципе. Например, существуют анализаторы с «охлаждаемыми зеркалами» «Chilled mirrors» [1]; на основе P_2O_5 [2]; с емкостными датчиками [3].

У всех методов измерения есть свои плюсы и минусы, но основной проблемой является низкая точность. В связи с этим в последние десять лет нынешнего века отмечается рост продаж именно приборов, работающих по методу TDLAS.

Перестраиваемая диодно-лазерная абсорбционная спектроскопия (TDLAS) – прогрессивный метод, который применяют для обнаружения и измерения газов. В данном методе используются характеристики поглощения молекул газа в ответ на воздействие лазерного излучения. Основной принцип TDLAS основан на взаимодействии между настраиваемым диодным лазером и молекулами газа, при котором молекулы поглощают свет определенной длины волны, что позволяет проводить точные измерения концентрации газа [4].

Структурная схема газоанализатора

Впервые способ измерения количества влаги в природном газе методом TDLAS был описан в патенте США 7679059 от 16 марта 2010 года [5].

Анализаторы TDLAS позволяют измерять содержание влаги в режиме реального времени, преодолевая ограничения традиционных методов измерения, которые часто требуют сложной калибровки, что может привести к значительным погрешностям из-за колебаний давления.

Одним из ключевых преимуществ TDLAS является его способность напрямую измерять содержание влаги, не подвергаясь влиянию изменений температуры или давления пробы, в отличие от традиционных методов, упомянутых выше. Эта характеристика делает анализаторы TDLAS особенно эффективными для получения высокой точности при низком уровне влажности. Кроме того, анализаторы TDLAS практически не требуют технического обслуживания или капитального ремонта. Техническое обслуживание проводится только раз в пять лет, с простыми ежегодными проверками в промежутках, что снижает эксплуатационные расходы.

Еще одним важным преимуществом анализаторов, работающих по методу TDLAS, является чувствительность. Они могут определять концентрацию влаги до 1 промилле, что делает их пригодными для измерения остаточной влажности в сложных условиях, таких как, например, переработка природного газа.

Существенным минусом метода TDLAS являются примеси в газовой смеси. Присутствие других газов в смеси природного газа может привести к спектральным помехам, особенно от метана, этана и углекислого газа, что может затруднить точные измерения влажности. Эти помехи требуют использования специализированных алгоритмов анализа данных и методов калибровки для обеспечения точности измерения [5].

Электронные компоненты любого TDLAS-анализатора играют важную роль в обработке сигналов. Они отвечают за усиление обнаруженного сигнала, фильтрацию шума и преобразование. Более подробно принцип работы электронной части TDLAS-газоанализатора, показанной на рисунке 1, изложен в статье [6].

Метод, изложенный в данной статье, не требует использования датчиков, непосредственно контактирующих с изучаемой пробой природного газа, что устраняет необходимость замены чувствительных элементов при их загрязнении. Такой подход снижает в несколько раз затраты на эксплуатацию и упрощает обслуживание системы.

При прямом измерении поглощения длина волны (или, другими словами, по частоте излучения) диодного лазера изменяется сигналом перестройки – сканируется и регистрируется спектр пропускания.

Упрощенная структурная схема работы газоанализатора влажности в режиме прямого измерения поглощения показана на рисунке 2.

Схема, показанная на рисунке 2, представляет систему, в которой аппаратные и программные части взаимодействуют для измерения концентрации воды в газе с использованием диодной лазерной спектроскопии. Аппаратная часть (модули лазера и каналов) генерирует и регистрирует спектры, которые затем передаются в программную часть. Программная часть выполняет обработку данных: нормализацию, коррекцию и сопоставление с базой данных HITRAN [8]. Результаты расчетов, включая концентрацию воды и точку росы, выводятся на этапе итогового анализа. Таким образом, система представляет собой замкнутый цикл,

где аппаратная часть обеспечивает измерения, а программная часть отвечает за обработку и интерпретацию данных.



Рисунок 1. Структурная схема TDLAS-газоанализатора

Для начала разберем аппаратную часть (блок 1-5 на рисунке 2).

Блок 1 «Модуль диодного лазера (ДЛ)»: основной источник излучения, который генерирует лазерный свет. Система термоэлектрического охлаждения, основанная на элементе Пельтье (TEC: Thermoelectric Cooler – термоэлектрический охладитель), поддерживает стабильную температуру лазера.

Блок 2 «Аналитический канал»: лазерный луч направляется через газовый поток в аналитической кювете, где измеряется поглощение излучения молекулами воды.

Блок 3 «Реперный канал»: данный канал используется для сравнения с реперным (эталонным) газом. Он помогает исключить внешние помехи и откалибровать измерения.

Блок 4 «Канал базовой линии»: служит для измерения фонового сигнала, который не связан с молекулярным поглощением. Он используется для корректировки и повышения точности анализа.

Блок 5 «Датчики давления и температуры»: измеряются параметры среды (давление и температура), которые необходимы для расчетов и нормализации спектров.

Рассмотрим кратко программную часть. Она состоит из трех частей: предварительная обработка сигналов (блок 6–13 на рисунке 2), анализ спектров (блок 14–25 на рисунке 2) и построение и синтез спектров (блок 19–25 на рисунке 2).

Блоки 6–8 «Вырезание рабочей области»: из спектров аналитического, реперного и базового каналов выделяются только те участки, которые содержат полезную информацию.

Блоки 9–11 «Вычитание оптического нуля»: для каждого спектра удаляется базовый уровень (оптический ноль), чтобы исключить фоновые помехи.

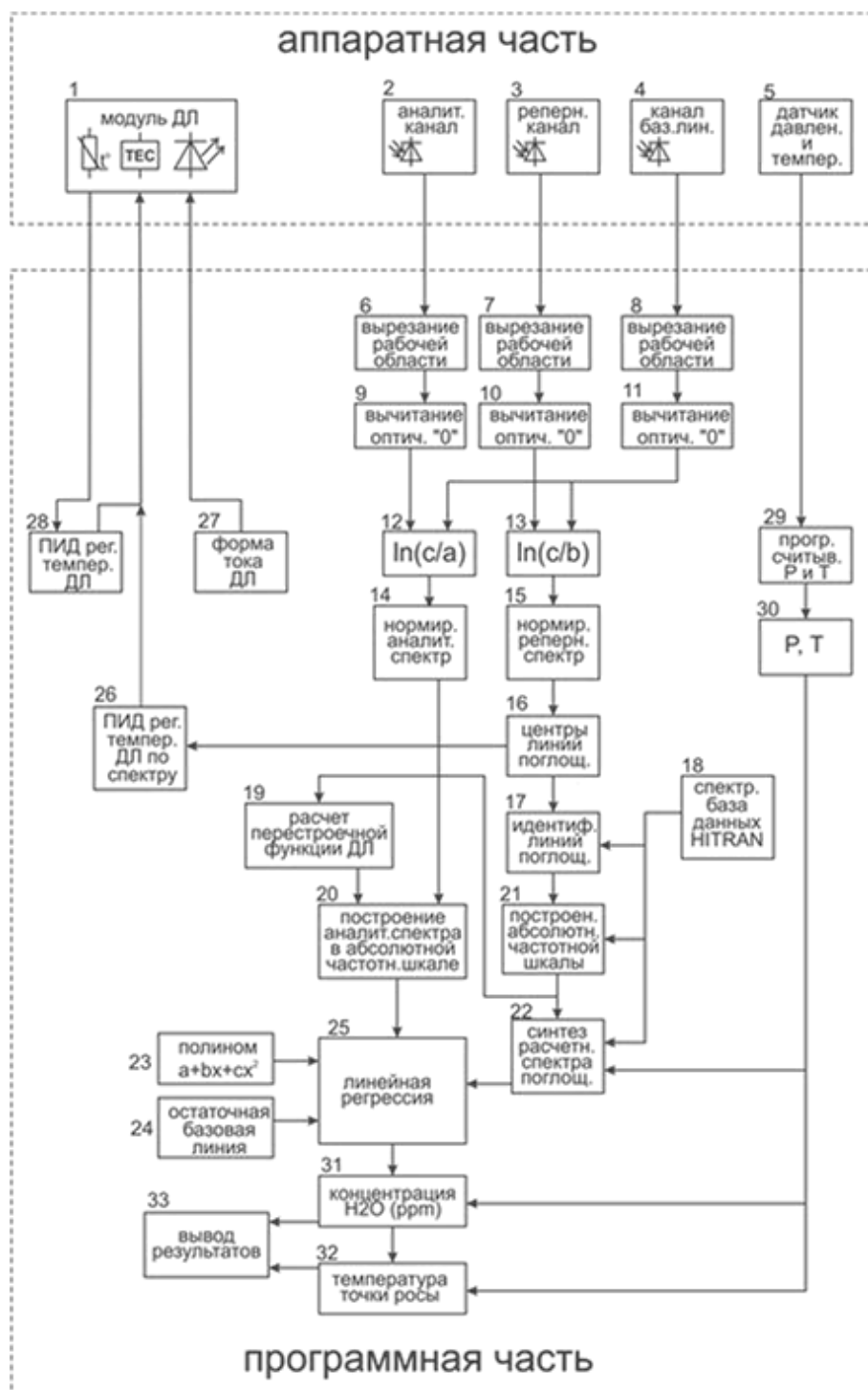


Рисунок 2. Упрощенная структурная схема работы газоанализатора в режиме прямого измерения поглощения

Блоки 12–13 «Логарифмические преобразования»: данные шаги позволяют нормализовать спектры, чтобы выделить информацию о молекулах воды.

Блоки 14–15 «Нормированные спектры»: после вычитания и нормализации спектры аналитического и реперного каналов подготавливаются к дальнейшему анализу.

Блоки 16–17 «Центры линии поглощения и их идентификация»: на основе данных спектра определяется положение линий поглощения молекул воды, которые затем сопоставляются с базой данных HITRAN.

Блок 18 «База данных HITRAN»: эта база предоставляет точные спектральные данные для молекул. Она используется для идентификации и расчета концентрации воды.

Блоки 19–22 «Расчет перестроенной функции и построение частотной шкалы»: измеренные спектры переводятся в абсолютную частотную шкалу, где они сравниваются с эталонным спектром.

Блоки 23–24 «Аппроксимация и коррекция базовой линии»: для учета нелинейностей проводится аппроксимация базовой линии с помощью полинома, а остаточные отклонения корректируются.

Блок 25 «Линейная регрессия»: метод используется для количественного анализа концентрации воды, основываясь на вычисленных параметрах спектра.

Последним этапом работы системы мониторинга в режиме прямого измерения поглощения является расчет результатов.

Блоки 26–28 «Регуляция параметров лазера»: температура и ток диодного лазера регулируются для поддержания стабильной работы системы.

Блоки 29–30 «Данные давления и температуры»: используются для учета влияния окружающих условий на спектральные характеристики.

Блоки 31–33 «Расчет концентрации воды и температуры точки росы»: на выходе система выдает концентрацию воды в ppm (миллионных долях) и температуру точки росы, которая зависит от содержания водяного пара.

Принцип работы анализатора влажности в режиме прямого измерения поглощения.

Для сканирования частоты излучения на диодный лазер (блок 1) подается периодический ток инжекции специальной формы, который рассчитывается в программе (блок 27) (рисунок 3).

В процессе тока инжекции можно выделить три стадии:

1. Нулевой ток (лазер выключен), где фиксируется электрический уровень оптического нуля.

2. Период, когда диодный лазер выходит на стационарный рабочий режим. Это неактивная зона с постоянным током инжекции, необходимая для завершения переходных процессов в лазере после его включения.

3. Основная рабочая стадия, на которой ток инжекции постепенно увеличивается, что вызывает перестройку и, как следствие, сканирование длины волны излучаемого лазером света [9].

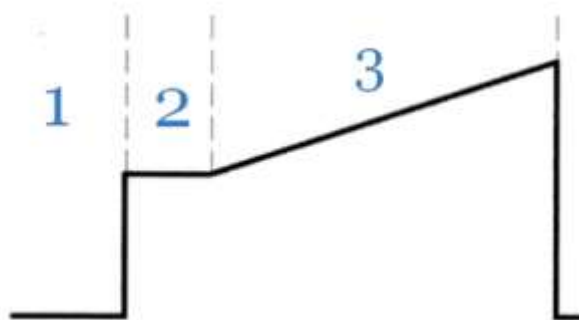


Рисунок 3. Форма тока инжекции диодного лазера

Излучение диодного лазера регистрируется в трех оптических каналах – в аналитическом (блок 2), реперном (блок 3) и в канале базовой линии (блок 4). После усиления эти сигналы поступают в МФУ (многофункциональное устройство) ввода-вывода NI-USB-6366 и оцифровываются с частотой 2 МГц и дискретностью 16 бит. Оптимальные значения были подобраны в ходе эксперимента.

Затем из всех трех сигналов вырезается основная рабочая область спектра, в которой происходит поглощение на нужной длине волны (частоте), то есть область 3 на рисунке 3 (блоки 6, 7, 8). Уровень электрического нуля на выходах усилителей фотодиодов не соответствует уровню оптического нуля. Это связано с разными причинами – смещение нуля в операционных усилителях, фоновая засветка фотодиодов и другие факторы. Поэтому необходимо провести корректировку уровня электрического нуля.

Электрический сигнал, соответствующий уровню оптического нуля, регистрируется в области 1 на рисунке 3, поскольку в этой части периода лазер выключен. Сигнал в области 1 (точнее, от 10 до 90% области 1, чтобы избежать разных краевых эффектов рядом с фронтами импульса) усредняется и полученное значение вычитается из области 3. В результате получаются три спектра пропускания с правильным значением оптического нуля (блоки 9, 10, 11).

Для дальнейшей обработки производится нормировка аналитического и реперного сигналов по базовой линии (блоки 12, 13).

После логарифмирования нормированных сигналов получаем спектр поглощения (рисунок 4) в аналитическом (блок 14) и реперном (блок 15) каналах:

$$\ln[(I_b(\nu)/I_i(\nu))] = \kappa(\nu) \cdot L + c, \quad (1)$$

где $I_i(\nu)$ – интенсивность излучения (спектр пропускания) в аналитическом либо в реперном канале, $I_b(\nu)$ – интенсивность в канале базовой линии, $\kappa(\nu)$ – коэффициент поглощения в соответствующем канале, L – длина оптического пути, c

– константа, связанная с различными интенсивностями в разных каналах (при одинаковых интенсивностях $c=0$).

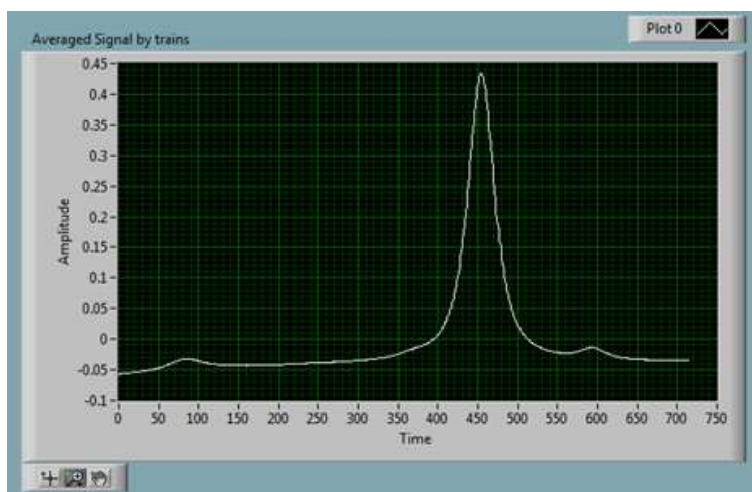


Рисунок 4. Спектр поглощения в реперном канале

На следующем этапе определяются центры линий поглощения воды в реперном канале (блок 16). Для этого прежде всего спектр поглощения в реперном канале сглаживается фильтром Савицкого-Голая [10] для удаления высокочастотного шума.

Затем берется вторая производная от сглаженного спектра и находятся все локальные максимумы второй производной, которые выше установленного порога.

Далее окрестности этих максимумов аппроксимируются гауссовской функцией определенной ширины, и затем находятся положения максимумов гауссовских пиков. Это позволяет избежать нахождения ложных шумовых пиков и значительно повысить точность нахождения центров линий поглощения.

После этого необходимо идентифицировать найденные линии поглощения, то есть соотнести каждый найденный пик с абсолютным значением оптической частоты (длины волны) (блок 17). Для этого используются полученные данные об интенсивностях и взаимном расположении пиков в реперном спектре поглощения, а также используются соответствующие данные из спектральной базы HITRAN-2020 (блок 18).

На первом этапе калибровки, считая приращение частоты генерации лазера строго пропорциональным приращению тока инжекции ($\Delta\nu \sim \Delta j_{\text{инж}}$) и зная приблизительный (средний) коэффициент пропорциональности b , каждому значению тока инжекции ставится в соответствие относительная частота:

$$\nu_{\text{отн}}(j) = (j - j_0) \cdot b, \quad (2)$$

где j_0 – начальное значение тока инжекции, подаваемого на лазер в ходе его частотной перестройки. Далее ищутся положения $\nu_{\text{отн}}^n$ и интенсивности A_n

максимумов линий в спектре поглощения (где n является индексом линии поглощения, соответствующей ее расположению на частотной шкале по отношению к остальным найденным линиям в изучаемом спектре) [11].

Приведенные выше действия позволяют получить два массива: частотный и амплитудный $[v_{\text{отн}}]$, $[A]$. Массивы формируются в формате базы данных HITRAN-2020 с числом данных, ограниченных количеством регистрируемых спектральных линий поглощения [11].

Для упрощения расчетов в дальнейшем частотный массив нормируется следующим образом:

$$v1_{\text{отн}}^n = v_{\text{отн}}^n - v_{\text{отн}}^0. \quad (3)$$

После такой нормировки нулевой отсчет в шкале частот соответствует первой линии массива.

Осуществляется уточнение частот линий поглощения с привязкой их к базе данных HITRAN-2020. Для этого первая линия массива $v1_{\text{отн}}^0$ совмещается с одной из линий базы данных HITRAN-2020 (v_{HITRAN}), в результате чего остальные линии этого массива получают новые значения, равные:

$$v2_{\text{отн}}^n = v1_{\text{отн}}^n + v_{\text{HITRAN}}. \quad (4)$$

Далее элементы массива $[v2_{\text{отн}}]$ совмещаются с ближайшими по спектру линиями из базы данных HITRAN-2020, при этом интенсивности соответствующих линий базы данных HITRAN-2020 образуют массив $[A_{\text{hit}}]$, по размеру эквивалентный массиву $[A]$, который служит уже для процедуры сравнения амплитудных характеристик базы HITRAN-2020 с полученным спектром. На основе проведенных экспериментов был сделан вывод, что, если добавить к интенсивностям линий поглощений шума на уровне 20% от средней интенсивности, корреляционное сравнение массивов $[A]$ и $[A_{\text{hit}}]$ может приводить к ошибочным результатам калибровки. По этой причине для корреляционного анализа были выбраны соотношения между соседними спектральными линиями в спектре как наиболее подходящие характеристики.

Таким образом, производится преобразование массивов $[A]$ и $[A_{\text{hit}}]$ в их характеристические массивы $[B]$ и $[B_{\text{hit}}]$, после чего вычисляется коэффициент корреляции для данной пары массивов $\text{corr}\{[B], [B_{\text{hit}}]\}$. Элементы характеристических массивов и коэффициент корреляции определяются следующими соотношениями:

$$B_l = A_{n+1}/A_n, \quad (5)$$

$$Bhit_l = Ahit_{n+1}/Ahit_n, \quad (6)$$

$$corr\{[B], [Bhit1]\} = \frac{\sum_l (B_l - \bar{B}) \cdot (Bhit_l - \bar{Bhit})}{\sqrt{\sum_l (B_l - \bar{B})^2 \cdot \sum_l (Bhit_l - \bar{Bhit})^2}}, \quad (7)$$

где l – индекс элемента массива. Такая операция проводится для всех линий спектрального диапазона из базы HITRAN-2020 вблизи области генерации лазера. Частотная привязка линий поглощения выполняется на основе максимального значения корреляции между положением линий измеренного спектра и линиями спектрального участка из базы данных HITRAN-2020.

В результате имеем абсолютные значения частот в нескольких точках из всей области перестройки диодного лазера.

Для построения абсолютной частотной шкалы во всей области перестройки лазера необходимо выполнить интерполяцию и экстраполяцию частот в найденных пиках поглощения (блок 21). Для этого используется кубическая сплайн-интер-экстраполяция. В результате можем рассчитать перестроечную функцию диодного лазера, то есть зависимость абсолютной оптической частоты от номера точки (отсчета), регистрируемого АЦП (блок 19).

Далее, используя перестроечную функцию диодного лазера, строится измеряемый спектр поглощения в аналитической кювете в абсолютной частотной шкале (блок 20).

Затем нужно рассчитать и синтезировать (создать модельный) образцовый спектр водяного пара в этой же абсолютной частотной шкале (блок 22). При расчете формы спектральных линий используется фойгтовский контур поглощения [12].

Для синтеза спектра кроме самой частотной шкалы нужны следующие данные:

- частоты центров линий поглощения в рабочей области перестройки диодного лазера, а также за границами этой области в пределах 3–5 см⁻¹;
- сечения поглощения для этих линий;
- энергия нижнего уровня каждого соответствующего колебательно-вращательного перехода;
- коэффициенты столкновительного уширения каждой линии в буферном газе;
- температурная зависимость коэффициентов столкновительного уширения;
- коэффициенты столкновительного сдвига каждой линии;
- давление газа в аналитической кювете;
- температура газа в аналитической кювете.

Все спектральные параметры (первые 6 из перечисленных) берутся из базы данных HITRAN-2020, хотя следует заметить, что их точность часто бывает недостаточной, поэтому в процессе отладки прибора их необходимо корректировать.

Последние два параметра (давление и температура газа в аналитической кювете) определяются по датчику в кювете (блок 5). Точность температуры газа должна равняться 0,5 ОС, а точность давления газа – 1 мБар. Датчик BMP280 от фирмы Bosch вполне удовлетворяет этим требованиям.

Заключение

В рамках настоящего исследования был разработан и реализован метод анализа данных для TDLAS-газоанализатора, предназначенного для высокоточного определения влажности в природном газе. Применение перестраиваемой диодно-лазерной абсорбционной спектроскопии позволило достичь высокой чувствительности и надежности измерений, особенно в условиях низких концентраций водяного пара, что является критически важным для контроля качества и безопасности на всех этапах газопереработки и транспортировки.

Разработанная система охватывает полный цикл обработки измерительного сигнала: от формирования и регистрации спектров в оптических каналах до детального программного анализа с использованием спектральной базы HITRAN и методов аппроксимации и регрессии. Существенным преимуществом предложенного подхода является отказ от прямого контакта чувствительных элементов с исследуемой средой, что значительно снижает эксплуатационные издержки и увеличивает срок службы оборудования.

Кроме того, внедренный метод калибровки по спектральным линиям реперного канала, а также учет нелинейностей перестройки частоты лазера обеспечили высокую точность сопоставления измеренных спектров с эталонными данными. Это позволило эффективно компенсировать спектральные помехи от сопутствующих компонентов газовой смеси и повысить достоверность результатов.

Пока на данном этапе обработки данных имеется два спектра: синтезированный образцовый спектр поглощения водяного пара и измеренный спектр поглощения в аналитической кювете, причем оба эти спектра построены в одной частотной шкале и при одинаковых условиях. Остается последний шаг – сравнить эти два спектра, а именно вычислить, сколько долей образцового спектра содержится в измеряемом аналитическом спектре.

Список литературы

1. Карюк В. М., Выкубенко О. Б. Патент № 90904 U1 Российская Федерация, МПК G01N 15/00. Устройство для измерения содержания водяного пара в природном газе: № 2009107840/22: заявл. 05.03.2009: опубл. 20.01.2010.

2. Габрусенок П. С. Патент № 2263936 С2 Российская Федерация, МПК G01W 1/11, G01N 25/56. Электролитический датчик влажности: № 2003106741/28: заявл. 11.03.2003; опубл. 10.11.2005; заявитель Войсковая часть 70170.
3. Галушкин С. С. Патент № 2296318 С1 Российская Федерация, МПК G01N 27/22. Емкостный датчик влажности: № 2005137258/28: заявл. 30.11.2005; опубл. 27.03.2007; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г.В. Плеханова (технический университет)».
4. Степанов Е. В. Диодная лазерная спектроскопия и анализ молекул-биомаркеров. Москва: Физматлит, 2009. 416 с.
5. Xin Zhou. Patent N 5,777,329 A US 7,679,059 B2. Measuring water vapor in (10): N 60/793.404: Appl. No.: 11/715.599: Filed: Mar. 7, 2007; Assignee: Spectra Sensors, Inc., Rancho Cucamonga, CA (US). 24 p.
6. Хаджийская Е. Ю. Разработка электронных блоков анализатора влажности природного газа // Вестник Новгородского государственного университета. 2023. 1 (130). 146–157. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.1(130).146-157
7. TDLAS Analyzers & Hygrometers | Baker Hughes DS. URL: <https://www.haulage365.com/panametrics/process-analyzers/moisture-analyzers/tdlas-hygrometer> (Дата обращения: 27.01.2025).
8. The HITRAN Database // HITRAN online. URL: <https://hitran.org/> (Дата обращения: 15.02.2025).
9. Хаджийская Е. Ю., Покровская М. В. Выбор диодного лазера при проектировании устройства для оценки влажности природного газа // Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем (Радиоинфоком-2022): сборник научных статей по материалам VI Международной научно-практической конференции, Москва, 06–10 июня 2022 года. Москва: МИРЭА – Российский технологический университет, 2022. С. 659–661.
10. Никонов А. В., Давлетшин Р. В., Яковлева Н. И., Лазарев П. С. Фильтрация методом Савицкого-Голея спектральных характеристик чувствительности матричных фотоприемных устройств // Успехи прикладной физики. 2016. 4 (2). 198–205.
11. Мирончук Е. С., Николаев И. В., Очкин В. Н., Родионова С. С., Спиридонов М.В., Цхай С.Н. Измерение отношения концентраций изотопов ^{13}C и ^{12}C при атмосферном давлении по поглощению излучения диодного лазера углекислым газом в области 2 мкм // Квантовая электроника. 2009. 39 (4). 388–391.
12. Херсонский В.К. О математических свойствах фойгтовского профиля спектральной линии // Астрофизические исследования. 1982. 15. 75–87.

References

1. Karyuk V. M., Vyskubenko O. B. Patent No. 90904 U1 Russian Federation, IPC G01N 15/00. Device for measuring the water vapor content in natural gas: No. 2009107840/22: application 05.03.2009: published 20.01.2010. (In Russian).
2. Gabrusenok P. S. Patent No. 2263936 C2 Russian Federation, IPC G01W 1/11, G01N 25/56. Electrolytic humidity sensor: No. 2003106741/28: application 11.03.2003: published 10.11.2005; applicant Military unit 70170. (In Russian).
3. Galushkin S. S. Patent No. 2296318 C1 Russian Federation, IPC G01N 27/22. Capacitive humidity sensor: No. 2005137258/28: application 30.11.2005: published on 27.03.2007; applicant State Educational Institution of Higher Professional Education

"St. Petersburg State Mining Institute named after G.V. Plekhanov (Technical University)". (In Russian).

4. Stepanov E. V. Diode laser spectroscopy and analysis of biomarker molecules. Moscow: Fizmatlit, 2009. 416 p. (In Russian).

5. Xin Zhou. Patent N 5,777,329 A US 7,679,059 B2. Measuring water vapor in (10): N 60/793.404: Appl. No.: 11/715.599: Filed: Mar. 7, 2007; Assignee: Spectra Sensors, Inc., Rancho Cucamonga, CA (US). 24 p.

6. Khadziyskaya E. Yu. Development of electronic blocks of the analyzer of humidity of natural gas // Vestnik NovSU. 2023. 1 (130). 146–157. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.1(130).146-157 (In Russian).

7. TDLAS Analyzers & Hygrometers | Baker Hughes DS URL: <https://www.haulage365.com/panametrics/process-analyzers/moisture-analyzers/tdlas-hygrometer> (Accessed: 15.10.24)

8. The HITRAN Database // HITRAN online. URL: <https://hitran.org/> (Accessed:15.02.2025).

9. Khadziyskaya E. Yu., Pokrovskaya M. V. The choice of a diode laser in the design of a device for assessing the humidity of natural gas // Actual problems and prospects for the development of radio engineering and information communication systems" (Radioinfocom-2022): Collection of scientific articles based on the materials of the VI International Scientific and Practical Conference, Moscow, 06–10 June 2022. Moscow: MIREA – Russian Technological University Publ., 2022. 659–661. (In Russian).

10. Nikonov A. V., Davletshin R. V., Yakovleva N. I., Lazarev P. S. Filtering by the Savitsky-Goley method of spectral sensitivity characteristics of matrix photodetectors // Successes of applied Physics. 2016. 4 (2). 198–205. (In Russian).

11. Mironchuk E. S., Nikolaev I. V., Ochkin V. N., Rodionova S. S., Spiridonov M. V., Tskhai S. N. Measurement of the ratio of concentrations of isotopes ^{13}C and ^{12}C at atmospheric pressure by absorption of diode laser radiation by carbon dioxide in the region of 2 microns // Quantum Electronics. 2009. 39 (4). 388–391. (In Russian).

12. Khersonsky V.K. On the mathematical properties of the Voigt profile of a spectral line // Astrophysical Research.1982.15. 75–87. (In Russian).

Информация об авторах

Хаджийская Елизавета Юрьевна – аспирант, МИРЭА – Российский технологический университет (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-9115-9871, lizahajiskaya@yandex.ru

Покровская Марина Владимировна – доцент, МИРЭА – Российский технологический университет (Москва, Россия), ORCID: 0009-0004-8571-4893, mar-pokrovskaya@yandex.ru