

Краткая информация о проекте

Наименование	АР26102313 «Когерентность и насыщение сигналов лазерного сенсора»
Актуальность	Актуальность проекта обусловлена необходимостью разработки новых высокочувствительных и надежных методов обнаружения и анализа газовых сред, имеющих важное значение для обеспечения промышленной и экологической безопасности (предотвращение взрывов, пожаров и отравлений). Традиционные спектральные методы анализа газов обладают ограниченной чувствительностью и не учитывают нелинейные, флуктуационные и хаотические режимы работы лазерных сенсоров. В связи с этим особую значимость приобретает применение современных информационно-энтропийных и флуктуационно-диссипационных подходов, позволяющих более точно описывать процессы самоорганизации, когерентности и насыщения в сигналах лазерных сенсоров. Несмотря на существующие исследования в данной области, остается недостаточно изученной физическая природа флуктуационных сигналов и их связь с концентрацией газа. Предлагаемый проект направлен на устранение данного пробела за счет разработки новых методов цифровой обработки сигналов и экспериментальных подходов, что позволит повысить точность идентификации газов и расширить возможности практического применения лазерных сенсорных систем.
Цель	Целью настоящего проекта является создание новой теоретической модели определения вида газа и его концентрации насыщения до отключения производства по сигналу лазерного излучения. Проведение физических экспериментов, создание образцов сенсора с цифровой технологией IoT для рекомендации в производство.
Задачи	Ставятся следующие основные задачи: 1) Из уравнения Эйнштейна-Смолуховского со случайной силой определить корреляционные функции по частоте, волновому числу (спектр Лоренца – термин в физике сенсорики, формула Коши в математике) для выходного напряжения лазерного сенсора газа. 2) Спектр Лоренца представить в форме, зависящей от отношения концентрации целевого газа к ее значению при равенстве энергии фотона к тепловой энергии кванта колебания (C/C_*). 3) Определить для сигналов лазерного сенсора режимы когерентности ($C < C_*$) и насыщения ($C > C_*$) для газов с различной симметрии структуры их молекул (метан, аммиак, этанол). 4) Экспериментальные результаты отклика полупроводникового фотодиода на прохождения

	лазерного луча через газы различной концентрации. 5) Получение спектра Лоренца вблизи основной частоты, возникающей при наличии флуктуаций в экспериментальных данных из-за бифуркаций удвоения периода сигнала от сетевого питания прибора. 6) Определение значений условной информации количественного критерия когерентности и контрастности экспериментального сигнала сенсора. 7) Определение значений диссипационной функции $th(2C/C_*)$ для экспериментальных режимов когерентности ($C < C_*$) и насыщения ($C > C_*$). 8) Алгоритмы цифровой технологии и аппаратурная реализация беспроводной передачи по IoT значений $th(2C/C_*)$ к центру анализа. 9) Рекомендации оптимальных значений параметров образца лазерного сенсора газа в производстве, оформление патентов.
Ожидаемые и достигнутые результаты	Ожидаемые результаты: - за 2025 год: Будет получена аналитическая формула зависимости спектра мощности Лоренца от частоты и полуширины спектра. Будет установлена зависимость спектра Лоренца от нормированной концентрации C/C_*, где C_* соответствует равенству энергии фотона и теплового движения. Будут построены графики функции диссипации для случаев $C < C_*$, $C \geq C_*$, отражающие переход между тепловым и когерентным режимами в газовой среде. - за 2026 год: Будут построены экспериментальные графики дисперсии, корреляций и флуктуационных напряжений для различных газов с учетом их молекулярной структуры. Будут определены бифуркационные значения концентрации C_* как в эксперименте, так и в теории для газов с различной структурой молекул. Будут вычислены нормированные значения условной информации для когерентного состояния на основе экспериментальных данных, что позволит количественно оценить степень упорядоченности сигнала. - за 2027 год: Будут построены графики $th(2C/C_*)$ по теоретическим моделям и экспериментальным данным для режимов $C < C_*$, $C \geq C_*$. Будут разработаны алгоритмы и техники беспроводной передачи результатов функции $th(2C/C_*)$ с использованием технологий IoT включая различные смеси газа. Будут подготовлены и представлены научные публикации, оформлены заявки на патенты (в том числе на полезную модель), а также разработаны рекомендации по внедрению полученных результатов в производственные процессы. Достигнутые результаты за 2025 год: Была получена формула зависимости спектра

мощности Лоренца от частоты, полуширины спектра. В результате теоретического анализа флуктуационно-диссипационного соотношения была выведена аналитическая форма спектра мощности флуктуаций сигнала вблизи основной частоты ω_0 с учётом поглощения фотонов газовой средой. Формула Лоренцева спектра получена как функция частоты ω и полуширины спектральной линии, что позволило описать энергетическую структуру флуктуаций в режиме малого поглощения и в условиях приближения $\hbar\omega_0 \ll 2kT$. Полученная зависимость используется как базовая модель для последующих этапов анализа насыщения.

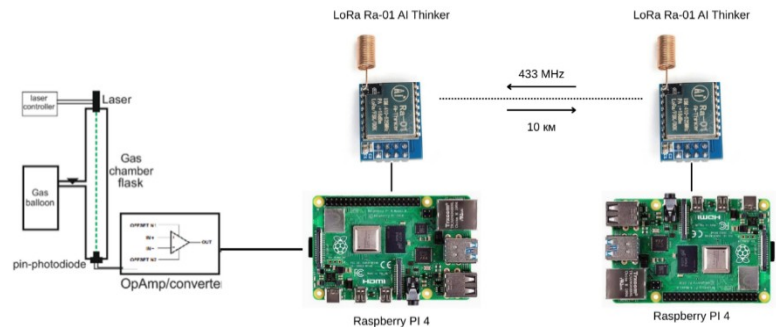


Рисунок 1. Блок-схема передачи данных сенсора на расстояние

Была получена зависимость спектра Лоренца от C/C_* , где C_* – значение концентрации газа при равенстве энергии фотона и теплового движения среды.

На основе упрощённой формы флуктуационно-диссипационного соотношения установлена зависимость нормированной интенсивности спектра от отношения текущей концентрации газа C критической концентрации C_* , при которой энергия поглощённого фотона сравнима с тепловой энергией среды. Показано, что спектральный отклик сенсора описывается функцией

$$I(\omega) |_{I_{max}} = \tanh\left(\frac{2C}{C_*}\right),$$

что отражает переход системы от прозрачного режима (малые концентрации) к области насыщения (большие концентрации). Параметр C_* определён теоретически через квантовые и температурные характеристики газа, что обеспечивает физически обоснованную нормировку измеряемого сигнала.

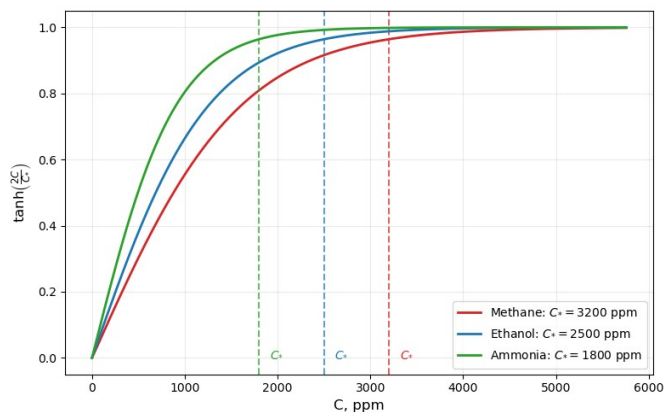


Рисунок 2 - Теоретическая модель насыщения для газов метана, аммиака и этанола

Были получены графики функции диссипации для случаев $C < C_*$, $C \geq C_*$. На основе полученной функции диссипации $\tanh(2C/C_*)$ были построены теоретические графики поведения газового сенсора в режимах до насыщения и при наступлении насыщения. Для диапазона $C < C_*$ показана линейно-сигмоидальная зависимость с плавным ростом отклика, характерная для области преобладания прозрачности. В области $C \geq C_*$ получена выраженная нелинейность и выход сигнала на насыщение, что согласуется с физическими процессами доминирующего поглощения фотонов молекулами газа. Построенные графики использованы для верификации экспериментальных данных и калибровки алгоритма анализа концентрации.

Имена и фамилии членов исследовательской группы с их идентификаторами (Scopus Author ID, Researcher ID, ORCID, при наличии) и ссылками на соответствующие профили

Жанабаев Зейнулла Жанабаевич – Scopus Author ID: 15840905700; <https://orcid.org/0000-0001-5959-2707>
Иманбаева Акмарал Каримовна – Scopus Author ID: 15054326000; <https://orcid.org/0000-0001-9900-9782>
Ханиев Бақыт Абайұлы – Scopus Author ID: 57218681308; [ORCID: 0000-0002-0103-9201](https://orcid.org/0000-0002-0103-9201)
Акниязова Айгерим Жанатовна – Scopus Author ID: 59194078400; <https://orcid.org/0000-0002-9185-3185>
Тілеу Аян Оразбайұлы – Scopus Author ID: 57218680509; <https://orcid.org/0000-0001-9965-6728>
Ашимов Ескендыр Калмухамбетович – Scopus Author ID: 57694992000; <https://orcid.org/0000-0002-1316-0156>
Үсіпов Нұржан Мұсайыпұлы – Scopus Author ID: 57226319348; <https://orcid.org/0000-0002-2512-3280>
Сагидолда Ерулан – Scopus Author ID: 56465977800; <https://orcid.org/0000-0002-4608-7573>
Бегалы Зере Дидарқызы
Туенбаев Озат Кунапьянович

Использование

Лазерные сенсоры и методы анализа флуктуационных сигналов применимы для промышленного мониторинга газовых сред, контроля концентрации опасных газов, предупреждения аварийных ситуаций (взрывы, пожары, отравления), а также для научных исследований

	физических процессов в газовых системах.
Приоритет в сравнении с реальными аналогами	Предлагаемый проект обладает рядом существенных преимуществ по сравнению с существующими аналогами в области газоаналитических сенсорных систем. В отличие от традиционных методов, основанных преимущественно на оптической спектроскопии и законе Бугера–Ламберта–Бера, в данном проекте используется принципиально новый подход, основанный на анализе флуктуационных сигналов с применением информационно-энтропийных и флуктуационно-диссипационных методов. Ключевым преимуществом является использование нормированной зависимости спектральной интенсивности от отношения концентрации газа C/C_*, что обеспечивает физически обоснованную калибровку сенсора без необходимости изменения геометрических параметров измерительной системы. В отличие от аналогов, предлагаемый метод позволяет выявлять переходные режимы между когерентным состоянием и насыщением, что существенно повышает точность и чувствительность измерений, особенно в области малых концентраций. Дополнительным приоритетом является учет нелинейных, хаотических и бифуркационных эффектов в сигнале сенсора, которые в существующих подходах, как правило, игнорируются. Это позволяет более полно описывать физическую природу взаимодействия лазерного излучения с газовой средой и расширяет диагностические возможности метода. В отличие от существующих решений, проект предусматривает цифровую обработку сигналов в реальном времени и интеграцию с IoT-технологиями для дистанционной передачи и анализа данных, что повышает оперативность мониторинга и расширяет область практического применения. Таким образом, предлагаемый подход обеспечивает более высокую информативность, точность и универсальность по сравнению с известными аналогами и создает научно-техническую основу для разработки нового поколения лазерных газовых сенсоров.
Список публикаций с ссылками на них	Zhanabaev Z., Akniyazova A., Ashimov Y. Information–Entropy Analysis of Stellar Evolutionary Stages with Application to FS CMa Objects //Entropy. – 2025. – V. 27. – No. 11. – p. 1106. https://doi.org/10.3390/e27111106
Информация о патентах	Был подан патент на полезную модель в Национальный институт интеллектуальной собственности РК: «Алгоритм реализации IoT технологии передачи на расстояние насыщения сигнала газового сенсора по росту концентрации» Входящий номер № 2025-92971 от 26.11.2025 Штрих код № 3756112

