

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА КОНСТРУКТИВА ДАТЧИКА АТМОСФЕРНОГО ОЗОНА

Д. В. Филатов

Мы поставили перед собой задачу разработать относительно недорогой, но достаточно точный датчик атмосферного озона. В первую очередь, необходимо разобраться с понятием «достаточно точный» - какой именно диапазон измерений нас интересует?

Согласно нормативной документации, ПДК озона в воздухе рабочей зоны составляет 0.1 мг/м^3 ^[1], максимальная разовая ПДК в воздухе населённых мест 0.16 мг/м^3 , а среднесуточная ПДК в воздухе населённых мест 0.03 мг/м^3 ^[2]. Исходя из этого, нам бы хотелось, чтобы разрешение нашего датчика равнялось хотя бы 0.01 мг/м^3 , и таким же было бы минимально определяемое значение. Идеальный диапазон — от 0 до 2 ПДК м. р., то есть, примерно $0...0.30 \text{ мг/м}^3$ с шагом 0.01 мг/м^3 . В этом случае, нас вполне устроит погрешность прибора в пределах $\pm 10\%$, то есть, в пределах одного шага измерения в обе стороны в области ПДК в воздухе рабочей зоны. Предупреждающий сигнал можно будет подавать уже от измеренного уровня 0.08 мг/м^3 .

Затем, необходимо определиться с методом детектирования (измерения концентрации) атмосферного озона. Неплохой литературный обзор способов детектирования озона, приведённый в^[3], позволяет нам отбросить большинство хемилюминесцентных и электрохимических методов и сразу сосредоточиться на методе абсорбционной спектроскопии. Здесь стоит отметить, что в указанной работе концентрация озона, как правило, приводится в единицах ppb(v) — количество частей на миллиард по объёму. Чтобы конвертировать ppb в используемые в настоящем тексте единицы измерения мг/м^3 , необходимо воспользоваться следующим равенством^[4]:

$$1 \text{ мг/м}^3 (\text{O}_3) = 500 \text{ ppb} (\text{O}_3)$$

В работе^[3] утверждается, что применяемый авторами метод детектирования озона с помощью УФ-светодиода позволяет добиться чувствительности измерений на уровне 3 ppb, или 6 мкг/м^3 . Такой чувствительности вполне достаточно для наших задач. К тому же, использование УФ-светодиодов представляется недорогим решением. Всё это позволяет нам остановить свой выбор именно на таком методе детектирования атмосферного озона. В целом, мы считаем достаточным взять готовую схему детектора из работы^[3] для изготовления

прототипа с целью дальнейшего эмпирического исследования выбранного метода в лабораторных условиях.

Однако, прежде нам бы хотелось узнать более подробно, каков спектр поглощения атмосферного озона и какие ещё атмосферные газы поглощают на тех же самых частотах (то есть, мы хотим установить возможные мешающие влияния).

Источником ценной информации в этом плане является работа^[5]. Стоит в первую очередь отметить, что результаты, полученные авторами, по их собственному признанию практически не зависят от давления газа и, по-видимому, от температуры. Авторы исследуют несколько полос поглощения в спектре озона. Все эти полосы были открыты ранее другими исследователями и, очевидно, названы в их честь:

1. Hartley bands, 200...300 нм
2. Huggins bands, 300...360 нм
3. Chappius bands, 440...850 нм

Нас могут заинтересовать две области: Hartley bands (Хартли) и Chappius bands (Шапюи, латинское написание фамилии согласно^[5]). Разница интенсивности поглощения озона в этих двух областях составляет несколько порядков, самое сильное поглощение происходит в области полосы Хартли. Однако, полоса Шапюи приходится на область видимого света. Мы могли бы сконструировать детектор, содержащий не один, а два светодиода: УФ-светодиод с длиной волны в области пика полосы Хартли (255 нм) и светодиод с длиной волны в области видимого света (650 нм). Несмотря на то, что интенсивность поглощения на этих частотах различается более, чем в 2000 раз, мы, тем не менее, могли бы попробовать такой подход для достижения селективности определения озона (сигнал на частоте в полосе Шапюи, коррелирующий с основным сигналом на частоте в области полосы Хартли, мог бы служить маячком, показывающим, что детектор определил именно озон и ни что иное).

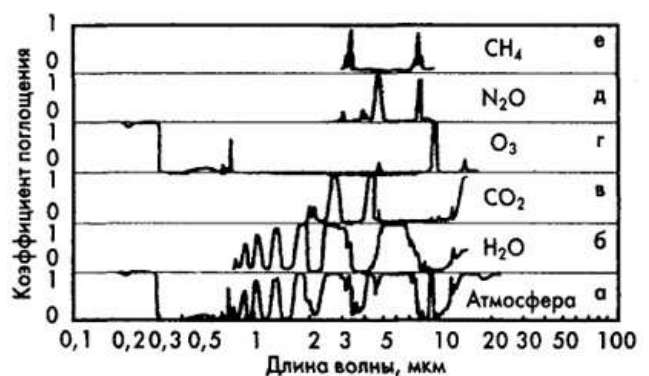


Рис. 1. Спектры поглощения некоторых атмосферных газов и паров воды.

Тем не менее, вопрос селективности определения

озона и исследования мешающих влияний остаётся открытым. В работе [3] утверждается, что применение УФ-светодиода с длиной волны 260...270 нм показывает высокую селективность детектирования атмосферного озона. Литературный поиск не выявил пересечения полос поглощения озона с другими наиболее распространёнными атмосферными газами, а также парами воды. Это отражено на рис. 1. Единственным близко расположенным, но не оказывающим существенного мешающего влияния участком поглощения является полоса Херцберга (Herzberg bands, 240...260 нм) для кислорода.

Однако, совершенно очевидно, что в вычислительный блок конструируемого датчика необходимо заложить базовую линию, соответствующую поглощению атмосферного воздуха, не содержащего озона. Все дальнейшие измерения следует проводить относительно этой базовой линии («нулевой пробы»). Чтобы откалибровать («занулить») датчик по воздуху, не содержащему озона, нам может потребоваться деструктор озона. Впрочем, в работе [3] калибровку проводят по чистому азоту. Вопрос выбора деструктора озона носит, скорее, экономический характер и здесь подробно рассматриваться не будет. Отметим лишь, что спектр деструкторов озона довольно широк — от активированного угля до стальных сеток с платиновым или серебряным катализатором.

Итак, для создания прототипа датчика атмосферного озона предлагается изготовить измерительную кювету, состоящую из стальной трубки длиной 50 см [3] (дальнейшие лабораторные испытания должны помочь найти оптимальную длину и материал такой трубки). Эта трубка должна быть запаяна с обоих торцов (рис. 2). В торцы следует вмонтировать два светодиода (с длинами волн 265 нм и 650 нм) и два фотодиода, способных детектировать указанные длины волн, причём таким образом, чтобы в каждом торце было по одному свето- и фотодиоду, а пары свето- и фотодиодов, комплементарных друг другу, располагались в противоположных торцах.



Рис. 2. Принципиальная схема детектора озона.

Очевидно, что не существует (дешёвого)

фотодиода, работающего в диапазоне 250...700 нм, поэтому вряд ли получится использовать один фотодиод в данной конструкции. Отдельно следует изучить вопрос использования светодиодов в качестве детекторов излучения. Известно, что светодиоды могут выполнять роль фотодиодов. Если подтвердится, что светодиоды способны детектировать не только ту длину волны, на которой излучают сами, это потенциально может привести к полному отказу от использования фотодиодов в конструкции и применению расположенных друг против друга светодиодов для детектирования излучения друг друга.

Близко к торцам трубки следует расположить два клапана — один впускной, с вмонтированным в него воздушным насосом (вентилятором), а второй — выпускной, с вмонтированным в него датчиком Холла. Кроме того, очевидно, что на впускном клапане следует предусмотреть грубый воздушный фильтр для предотвращения попадания в кювету пыли.

Предлагается дискретный принцип работы указанного детектора. Воздушный насос прокачивает через кювету какое-то количество исследуемого воздуха, чтобы проба в кювете обновилась. Затем на 10 с включается УФ-светодиод, а показания с него снимает УФ-фотодиод. Потом УФ-светодиод выключается, на 10 с включается светодиод видимого спектра, а показания с него снимает фотодиод видимого спектра. Время регистрации взято из работы [3], но этот вопрос следует дополнительно изучить. Получив данные замеров, вычислительный блок анализирует поступившую информацию, ищет корреляцию между показаниями замеров на двух длинах волн и решает, действительно ли измерено содержание озона, а затем, зная общий объём кюветы и характеристики базовой линии, вычисляет это значение в единицах мг/м³. Наличие датчика Холла в данной конструкции предусмотрено для контроля работы воздушного насоса, а также, в дальнейшем, для усовершенствования конструкции и переделки её в непрерывный режим работы.

Нерешённым остаётся ряд вопросов. В первую очередь, мы не уделили должного внимания рассмотрению процессов фотолиза озона или кислорода воздуха под воздействием УФ-излучения светодиода. Впрочем, думается, что за время регистрации, равное 10 с, влияние возможных процессов фотолиза не внесёт существенной ошибки в измерения. Другой вопрос напрямую связан с первым. Очевидно, что чем выше мощность излучения светодиода, тем выше вероятность фотодиссоциации или фотолиза молекул, следовательно, необходимо выбирать

светодиод как можно меньшей мощности. Однако, при этом мощность светодиода должна быть достаточной для уверенного детектирования озона на всём требуемом диапазоне. При недостатке мощности высок риск выйти на плато при более низких концентрациях, чем верхняя граница заданного диапазона. Уменьшая мощность светодиода мы, согласно закону Бугера-Ламберта-Бера, должны, в таком случае, увеличивать длину оптического пути для сохранения требуемого диапазона измерений. И так, другой нерешённый вопрос: оптимальная длина кюветы. Открытым также остаётся вопрос калибровки датчика. Впрочем, приблизительные ответы есть и на эти вопросы. Что касается длины кюветы — можно отталкиваться от значения 50 см, применённого в работе ^[3], и далее экспериментально исследовать этот момент. По поводу же калибровки датчика, в связи с отсутствием какого-либо государственного стандартного образца, особый смысл приобретает следующая цитата из ^[6]: «Для газоанализаторов, применяемых для определения озона в атмосферном воздухе, первичным методом калибровки является фотометрия в УФ-области спектра». Иными словами, метод УФ-фотометрии можно считать «абсолютным», арбитражным методом, не требующим калибровки. Однако, перепроверить себя при помощи уже существующего газоанализатора озона было бы хорошей идеей.

Приведённые теоретические выкладки позволяют нам нащупать опору в вопросе конструирования датчика атмосферного озона, однако на практике всё может оказаться несколько иначе. Ведь давно известно, что в инженерии главный метод нахождения работоспособного решения — именно эмпирический, пускай и отталкивающийся от некоторых теоретических предпосылок.

*Март 2020
post@rxlab.org*

Литература

1. ГОСТ 12.1.005-88. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.
2. ГН 2.1.6.1338-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест. Гигиенические нормативы.
3. И. В. Николаев, В. Н. Очкин и др. Измерение концентрации озона в атмосфере по поглощению излучения УФ-светодиода.
4. Conversion between $\mu\text{g}/\text{m}^3$ and ppb. https://www2.dmu.dk/AtmosphericEnvironment/Expst/database/docs/PPM_conversion.pdf

5. M. Griggs. Absorption Coefficients of Ozone in the Ultraviolet and Visible Regions.

6. ГОСТ Р ИСО 15337-2013. Воздух атмосферный. Титрование в газовой фазе. Калибровка газоанализаторов озона (Переиздание).

Изображения

Рис. 1 — найден на просторах Интернета без указания авторства

Рис. 2 — собственная работа