

Е.А. Коротченко, А.Ю. Куров, В.Д. Николаев, Ю.Н. Пономарев,
М.И. Свистун, Б.А. Тихомиров

ИЗМЕРЕНИЕ СЕЧЕНИЯ ПОГЛОЩЕНИЯ ВОДЯНОГО ПАРА НА ЧАСТОТЕ ГЕНЕРАЦИИ ЙОДНОГО ЛАЗЕРА

Измерено сечение поглощения атмосферного водяного пара на частоте генерации йодного лазера ($\nu_0 = 7603,14 \text{ см}^{-1}$), которое при давлении воздуха в 1 атм составило величину $(1,15 \pm 0,15) \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$. В эксперименте отработана методика оптико-акустических измерений малых ($\leq 10^{-7} \text{ см}^{-1}$) значений коэффициента поглощения газа, активно адсорбируемого стенками измерительной ячейки. Рассчитанное значение коэффициента поглощения атмосферного воздуха при нормальных условиях полностью определяется поглощением излучения водяным паром и составляет величину $\kappa \approx 3 \cdot 10^{-7} \text{ см}^{-1}$.

Водяной пар является основным компонентом атмосферного воздуха, ответственным за поглощение оптического излучения в видимом и ПК диапазонах спектра. Количественная информация о сечении поглощения H_2O требуется практически для всех лазерных длин волн как основа прогноза распространения лазерного излучения в атмосфере. Для йодного лазера такая информация необходима еще и потому, что водяной пар входит в состав рабочей среды лазера [1]. Наличие данных о сечении поглощения H_2O на длине волны генерации позволяет учесть потери в резонаторе лазера, вызванные поглощением паров воды.

Экспериментальные исследования поглощения молекулярными газами излучения йодного лазера проведены в работах Брэгга с соавторами [2, 3]. В [2] установлено, что поглощение излучения с частотой $7603,14 \text{ см}^{-1}$ в атмосфере обусловлено крыльями линий CO_2 , H_2O , CH_4 и NH_3 . В [3] сообщается о точных измерениях оптико-акустическим (ОА) методом сечений поглощения (σ) излучения химического йодного лазера для CO_2 : $\sigma_{\text{CO}_2} = (5,4 \pm 0,4) \cdot 10^{-25} \text{ см}^2$ и CH_4 : $\sigma_{\text{CH}_4} = (8 \pm 2) \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$, находящихся в воздухе при естественной концентрации, при общем давлении воздуха 10^2 КПа . Этих данных недостаточно для оценок энергетических потерь излучения йодного лазера в атмосфере, так как основной вклад в поглощение следует ожидать от атмосферного H_2O .

Целью настоящей работы является измерение сечения поглощения атмосферного водяного пара на частоте излучения импульсного йодного лазера оптико-акустическим методом. В эксперименте применена усовершенствованная по сравнению с [3] методика измерения малых ($\leq 10^{-7} \text{ см}^{-1}$) значений коэффициента поглощения, активно адсорбируемого H_2O на фиксированной частоте генерации.

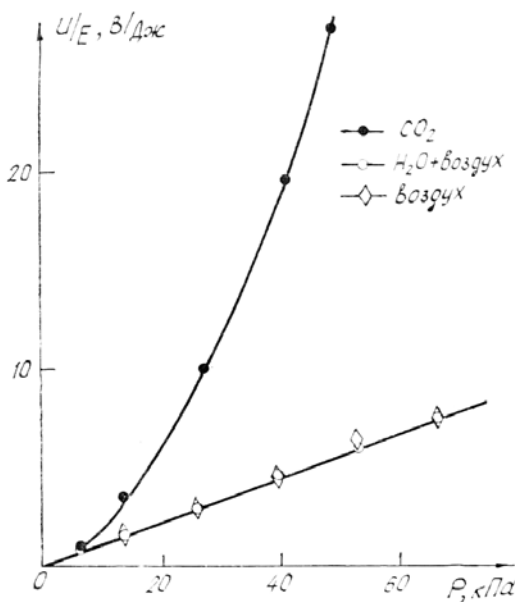


Рис. 1. Зависимость механического импеданса микрофона от давления

Измерения проводились на ОА спектрометре с импульсным фотодиссоционным йодным лазером, схема которого аналогична описанной в [4]. В состав спектрометра входили лазер, оптико-

акустический детектор (ОАД), вакуумная система для составления газовых смесей и их напуска в ячейку ОАД, система регистрации временных, спектральных и энергетических характеристик лазерного излучения и сигнала ОАД.

В режиме свободной генерации лазер генерировал импульс излучения пиковой структуры с общей длительностью $\tau_{\text{и}} \sim 200$ мкс и энергией $E_{\text{лаз}} \leq 0,25$ Дж. Спектр излучения состоял из одной компоненты с шириной $\Delta\nu = (4,2 \pm 0,3) \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$. При измерении $\Delta\nu$ использовались эталон Фабри-Перо с базой $d = 30$ мм и длиннофокусный объектив МТО–1000. Регистрация интерферограмм производилась на фотопленку типа И–3. Энергия лазерного импульса измерялась калориметром ВЧД–2.

Ячейка ОАД из нержавеющей стали с полированными стенками и кварцевыми окнами имела размеры $\varnothing 15 \times 100$ мм. Для контроля зависимости чувствительности измерительного микрофона ОАД от давления и состава газа в ячейке, в конструкцию микрофона был введен электрод–активатор [5]. Форма и амплитуда сигнала ОАД регистрировались с помощью запоминающего осциллографа С8–17.

Экспериментальное определение сечения поглощения паров H_2O осуществлялось, после проведения процедуры калибровки ОАД по известному поглощению излучения на той же частоте смесью углекислого газа с воздухом.

Водяной пар получался путем испарения в вакуум дважды дистиллированной воды. Воздух перед напуском осушался с помощью азотной ловушки. Вначале в баллон–смеситель емкостью 3 л через порционный кран напускалось известное количество пара, а затем добавлялся осушенный воздух до давления, обеспечивающего требуемую концентрацию. Было установлено, что на состав смеси в значительной степени влияет адсорбция паров H_2O стенками баллона–смесителя, соединительных трубок и самой ячейки. Поэтому перед измерениями в течение нескольких (5–10) часов вакуумная система и ячейка ОАД выдерживались заполненными такой смесью и при том же давлении, при котором затем проводились измерения. Только после этого баллон и ячейка быстро откачивались, вновь заполнялись подготовленной смесью после чего проводились измерения, продолжительность которых не превышала 30 мин. Согласно [5] такая процедура позволяет исключить погрешность измерений, связанных с адсорбцией поглощающего газа стенками.

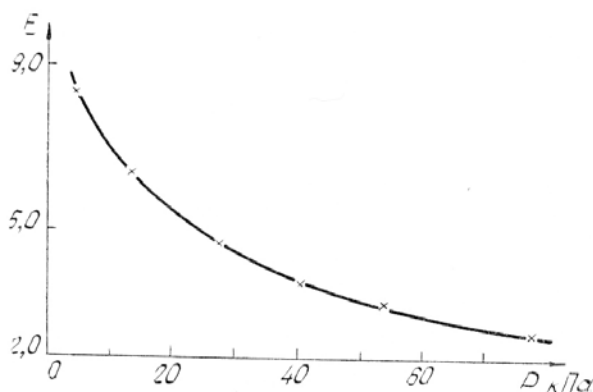


Рис. 2. Зависимость сигнала оптико–акустического детектора от давления в ячейке спектрофона

Другой проблемой, которая возникает при измерениях поглощения оптического излучения слабопоглощающими газами ОА методом, является проблема разделения сигнала, обусловленного поглощением в газе («полезный» сигнал), от сигнала, обусловленного поглощением в окнах и стенках ячейки («паразитный фоновый» сигнал). Вклад «паразитного фонового» сигнала в отклик ОАД может быть сравним с вкладом от «полезного» сигнала и даже превышать его. Природу сигнала ОАД можно установить, если снимать зависимость его амплитуды от давления газа в ячейке P . При изменении давления «паразитный фоновый» сигнал линейно пропорционален P , а «полезный» сигнал, обусловленный поглощением в крыле спектральной линии (полосы), меняется $\sim P^2$.

На рис. 1 представлены результаты измерений зависимости амплитуды сигнала ОАД от давления исследованных газов: химически чистого CO_2 , осушенного и влажного воздуха (1,33 КПа H_2O + 97,7 КПа осушенного воздуха). Пороговая чувствительность ОАД $\kappa_{\text{пор}} 10^{-7} \text{ см}^{-1} \text{ Дж}$. При построении графиков на рис. 1, учтена зависимость механического импеданса измерительного микрофона ϵ от давления газа в ячейке (рис. 2).

Анализ результатов показывает, что для CO_2 сигнал ОАД обусловлен поглощением в крыльях линий (квадратичная зависимость от P), что согласуется с выводами работы [2].

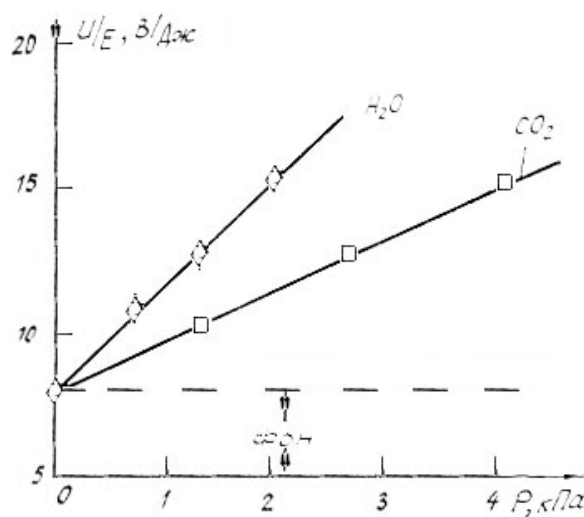


Рис. 3. Зависимость амплитуды ОА сигнала от концентрации H_2O и CO_2 . $P_{\text{общ}} = 70,5$ КПа

Для смеси водяного пара с воздухом сигнал ОАД полностью определяется «паразитным фоновым» сигналом (линейная зависимость от P для сухого и влажного воздуха). Вклад «полезного» сигнала, обусловленного поглощением H_2O , из этих результатов определить невозможно из-за недостаточной чувствительности ОАД и большой величины фонового сигнала.

Определение сечения поглощения для чистого водяного пара при давлениях $P \leq 2$ КПа (т. е. меньших, чем давление насыщающего пара) затрудняется тем, что в этой области давлений на чувствительность ОАД влияет конкуренция между процессами VT -релаксации в газе и деактивацией колебательно-возбужденных молекул на стенках ячейки ОАД. Это приводит, во-первых, к уменьшению чувствительности, а во-вторых, к повышению погрешности при обработке результатов измерений вследствие усложнения процедуры калибровки ОАД [6].

Для уверенной регистрации «полезного» сигнала от поглощения излучения парами H_2O была улучшена до $3 \cdot 10^{-9}$ см^{-1} Дж пороговая чувствительность ОАД, и за счет коллимации лазерного пучка в ячейке снижен в 3 раза уровень «паразитного» фонового сигнала.

Увеличение чувствительности ОАД осуществлялось путем замены мембраны микрофона из алюминиевой фольги толщиной ~ 10 мкм на мембрану из тонкой (2 мкм) лавсановой пленки с напыленным на нее слоем алюминия. Использовалась методика измерения, апробированная в работе [2]. При постоянном давлении газовой смеси в ячейке снималась зависимость амплитуды сигнала ОАД от концентрации поглощающего газа. Давление буферного газа (воздуха) более чем на порядок превышало давление водяного пара или CO_2 . На первом этапе измерений в ячейку ОАД напускался осушенный воздух при давлении 70,5 КПа с переменным (0–4 КПа) содержанием CO_2 . Затем аналогичные измерения были выполнены для смеси H_2O с воздухом ($P_{\text{H}_2\text{O}} = 0\text{--}2$ КПа). Процедура составления газовых смесей и их напуска в ячейку ОАД оставалась прежней. Результаты измерений представлены на рис. 3.

Такая методика измерений позволила уверенно разделить «полезный» и «паразитный фоновый» сигналы, по известному поглощению излучения лазера углекислым газом в воздухе прокалибровать ОАД и определить сечение поглощения атмосферного водяного пара.

Определенная из эксперимента величина сечения поглощения H_2O при давлении воздуха в 1 атм оказалась равной $\sigma_{\text{H}_2\text{O}} = (1,15 \pm 0,15) \cdot 10^{-24}$ см^2 , что хорошо согласуется с данными работы [6], появившейся в печати после завершения наших измерений. В [6] методом Фурье-спектроскопии с многоходовой кюветой получено значение поглощения водяного пара в атмосферном воздухе $\sigma_{\text{H}_2\text{O}} = (1,1 \pm 0,2) \cdot 10^{-24}$ см^2 .

Рассчитанное значение коэффициента поглощения атмосферного воздуха на частоте генерации йодного лазера $\nu_0 = 7603,14$ см^{-1} при концентрациях $\rho_{\text{CO}_2} = 335$ ppm , $\rho_{\text{CH}_4} = 1,69$ ppm и $\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 10^4$ ppm [8] и сечениях поглощения $\sigma_{\text{CO}_2} = 5,4 \cdot 10^{-25}$ см^2 , $\sigma_{\text{CH}_4} = 8 \cdot 10^{-24}$ см^2 [3], $\sigma_{\text{H}_2\text{O}} = 1,15 \cdot 10^{-24}$ см^2 полностью определяется поглощением излучения водяным паром и составляет величину $\kappa \approx 3 \cdot 10^{-7}$ см^{-1} .

1. Гизатуллин Р. М., Загидуллин М. В., Заикин А. П. и др. — Квантовая электроника, 1987 (в печати).
2. Bragg S. L., Lawton S. A. — Appl. Optics, 1984, v. 23, № 18, p. 3042.
3. Bragg S. L., Lawton S. A., Wiswall C. E. — Optics Letts., 1985, v. 10, № 7, p. 321.
4. Агеев Б. Г., Куров А. Ю., Николаев В. Д. и др. — Известия вузов СССР. Физика, 1986, № 6, с. 96.

5. Антипов А.Б., Капитанов В.А., Пономарев Ю.Н., Сапожникова В.А. Оптико-акустический метод в лазерной спектроскопии молекулярных газов. — Новосибирск: Наука, 1984. — 128 с.
6. Bragg S.L., Kelleу J.O. — Appl. Optics, 1987, v. 26, № 3, p. 506.
7. Агеев Б.Г., Пономарев Ю.И., Тихомиров Б.А. Нелинейная оптико-акустическая спектроскопия молекулярных газов. — Новосибирск: Наука, 1984. — 127 с.
8. Костко О.К., Протасов В.С., Хаттатов В.У., Чаянова Э.А. Применение лазеров для определения состава атмосферы. — Л.: Гидрометеоздат, 1983. — 215 с.

Институт оптики атмосферы
СО АН СССР, г. Томск
Филиал Физического института имени
П. Н. Лебедева АН СССР, г. Куйбышев

Поступило в редакцию
28 сентября 1987 г.

E.A. Korotchenko, A.Yu. Kurov, V.D. Nikolaev, Yu.N. Ponomarev, M.I. Svistun, B.A. Tikhomirov. **Water vapor absorption cross section measurement at iodine laser generation frequency.**

The water vapor absorption cross section was measured at iodine laser generation frequency ($\nu_0 = 7603.14 \text{ cm}^{-1}$), which was determined to be $(1.15 \pm 0.15) \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2$ at 1 atm air pressure. The technique for opto-acoustic measurements of small absorption coefficient values of gas, having active adsorption on the cell walls, has been developed. The calculated value of the atmospheric-air absorption coefficient under normal conditions was fully determined by water vapor radiation absorption and was $\kappa \approx 3 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^{-1}$.