

УДК 621.371.166.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГЛОЩЕНИЯ РАДИОВОЛН В АТМОСФЕРНОМ ОКНЕ ПРОЗРАЧНОСТИ $\lambda = 0,73$ мм

В. Я. Рядов, Н. И. Фурашов

С помощью источника монохроматического излучения выполнены полевые измерения коэффициента поглощения атмосферных паров воды в диапазоне $0,71 \div 0,76$ мм. Измерения проводились методом изменяющейся влажности при расстоянии между передатчиком и приемником 1,58 км. Для обработки данных применены способы, учитывающие нелинейную зависимость коэффициента поглощения водяного пара от влажности, что позволило наряду с суммарным коэффициентом поглощения получить также ориентировочные сведения о поглощении мономерами и димерами паров H_2O раздельно. Величина суммарного коэффициента поглощения для стандартных атмосферных условий ($\rho = 7,5$ г/м³, $T = 293^\circ K$, $P = 760$ мм рт. ст.) равна 16,3 дБ/км. Проведено сопоставление полученных результатов с теоретическими расчетами и данными других измерений.

Молекулярное поглощение радиоволн в окне прозрачности атмосферы $\lambda \approx 0,73$ мм в ее приземном слое практически полностью определяется водяным паром [1]. Лишь на коротковолновом крыле окна заметный вклад в поглощение может дать линия вращательного спектра кислорода с резонансной частотой $14,17$ см⁻¹ [2,3]. Таким образом, исследование атмосферного поглощения в наиболее интересном интервале длин волн вблизи центра окна, где поглощение минимально, сводится к измерению коэффициента поглощения паров воды.

Такие измерения выполнялись рядом авторов (см. обзорные данные в [4]). Отличительной особенностью этих измерений является применение мало мощных тепловых источников, что сопряжено с невысоким спектральным разрешением и использованием небольшого оптического пути.

Другим недостатком их, как и вообще измерений поглощения в атмосферных парах воды, является то, что при обработке экспериментальных данных обычно принималась линейная зависимость коэффициента поглощения водяного пара $\Gamma_{вп}$ от абсолютной влажности ρ . Она, однако, не такова. С учетом эффекта само уширения линий мономеров H_2O , а также димерного механизма поглощения [5] указанная зависимость имеет более сложный характер. Экспериментальным подтверждением этому являются известные измерения на сантиметровых волнах Беккера и Ауллера [6], а также недавние измерения [7] поглощения в ИК области.

Следует отметить, что нелинейный характер зависимости $\Gamma_{вп}(\rho)$ (или $\ln I(\rho)$, где I — интенсивность измеряемого сигнала) отчетливо проявляется лишь при достаточно больших изменениях влажности (например, в измерениях [6] до 50 г/м³). При обычно же использовавшихся интервалах $\Delta\rho < 10$ г/м³ сравнительно слабая нелинейность зависимости $\ln I(\rho)$, как правило, маскируется разбросом экспериментальных данных. Кажущаяся линейность иногда расценивается даже как экспериментальное доказательство линейной связи между $\Gamma_{вп}$ и ρ .

В качестве примера на рис. 1 приведена зависимость $\ln I(\rho)$, полученная на одной из волн в настоящих измерениях. Линейная аппроксимация кажется вполне приемлемой и в этом случае. Действительно, об-

работка данных рис. 1 методом наименьших квадратов с использованием нелинейной аппроксимирующей функции дает кривую, мало отличающуюся в данном интервале $\Delta\rho$ от прямой. Однако оказывается, что даже в этом случае получаемые при обработке данные о величине квадратичного члена дают полезные сведения о характеристиках поглощения.

В настоящей статье дано описание измерений поглощения в диапазоне $0,71 \div 0,76$ мкм, которые являются первыми в этом окне измерениями с источником монохроматического излучения и большим базовым расстоянием. Целью работы являлись как проверка и уточнение имеющихся данных о прозрачности атмосферы вблизи $\lambda = 0,73$ мкм, так и апробация иных способов обработки

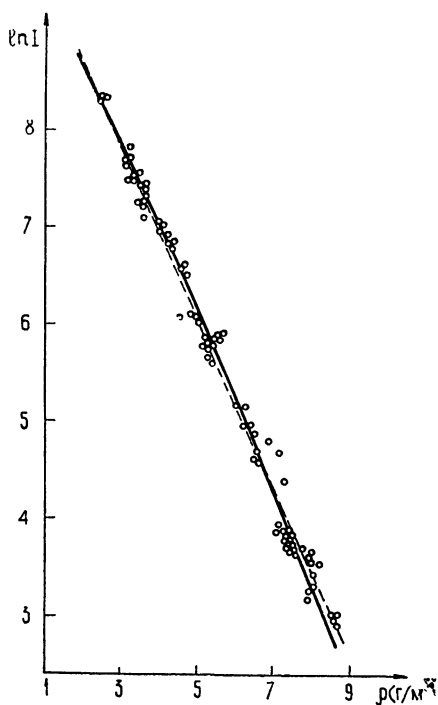


Рис. 1. Экспериментальная зависимость сигнала от влажности воздуха ($\lambda = 0,736$ мкм) и ее линейная (пунктир) и нелинейная аппроксимации методом наименьших квадратов.

измерений для получения более полной информации о поглощении, в частности, экспериментальных сведений о поглощении димерами водяного пара.

АППАРАТУРА. ПРОЦЕДУРА ИЗМЕРЕНИЙ

В качестве источника излучения в передатчике использовалась ЛОВ [8] с выходной мощностью $2 \div 4$ мвт. Антенна представляла собой двухзеркальную систему: параболическое зеркало диаметром 900 мм и эллиптический отражатель диаметром 100 мм (см. рис. 2). Передача высокочастотной энергии от ЛОВ к антенной системе осуществлялась при помощи волновода сечением $1,2 \times 2,4$ мм² и пирамидального рупора. Перед рупором помещался модулятор. Частота модуляции — 10 гц.

С целью контроля уровня излучаемой мощности передатчика в нем применен измеритель относительного уровня мощности с индикатором излучения ОАП-4. Схема отвода части выходной мощности ЛОВ к измерителю показана на рис. 2.

Чтобы учесть возможные изменения чувствительности ОАП-4 и усилительной аппаратуры измерителя мощности, проводилась его калибровка по эталонному источнику. Им служила лампа накаливания, а калибровочный сигнал представлял собой ИК излучение в участке $1 \div 2,5$ мкм, выделенное с помощью пропускающих фильтров.

Длина волны измерялась интерферометром Фабри—Перо. Плоские зеркала его представляли собой решетки, нарезанные на тонких алюминиевых слоях, нанесенных путем вакуумного испарения на кварцевые пластины (подробнее см. [9]). Погрешность измерений длины волны примерно $\pm 0,03\%$.

Для приема сигналов использовался радиометр с индикатором ОАП-4, который помещался в фокусе параболического зеркала (диаметр

900 мм, фокусное расстояние 365 мм). Калибровка чувствительности приемного устройства проводилась тем же способом, что и калибровка измерителя мощности в передатчике.

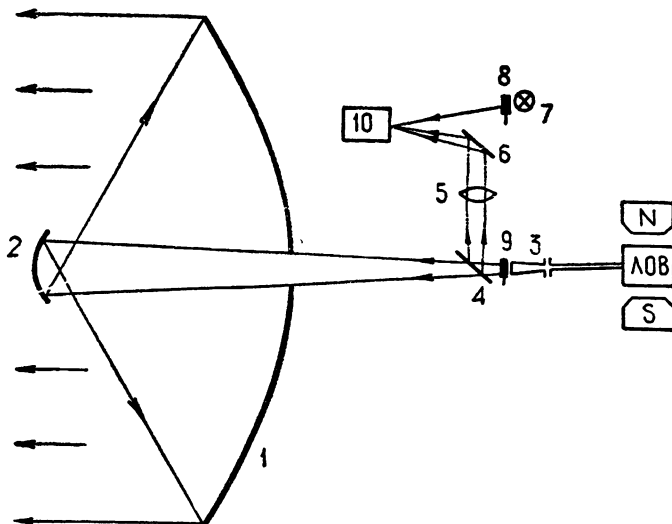


Рис. 2. Схема передатчика:

1 — параболическое зеркало, 2 — эллиптический облучатель, 3 — рупор, 4 — кварцевая пластина, 5 — кварцевая линза, 6 — плоское зеркало, 7 — эталонный источник, 8, 9 — модуляторы, 10 — приемник излучения.

Измерения выполнялись при расстоянии между передатчиком и приемником 1,58 км. Почти горизонтальная трасса проходила на высоте около $2 \div 4$ м от поверхности земли. При такой трассе луч частично касается подстилающей поверхности и, вообще говоря, возможно ее влияние на интенсивность измеряемого сигнала. Следует заметить, однако, что в эксперименте, выполняемом методом вариации влажности, ошибки измерений могут быть связаны лишь с изменениями этого влияния. Но в данном случае они заметно не проявлялись, несмотря на изменение состояния подстилающей поверхности в течение двух месяцев измерений. Наблюдалась повторяемость сигнала (в пределах обычного разброса), измеренного при различных состояниях подстилающей поверхности, но при одинаковых значениях абсолютной влажности воздуха.

Процедура измерений сводилась к следующему. Вначале проверялась правильность ориентации антенн передатчика и приемника по максимуму сигнала. Настройка выполнялась всегда на одной и той же длине волны. Затем производилась калибровка чувствительности приемника и одновременно измерителя уровня выходной мощности передатчика. После этого регистрировался измеряемый сигнал в пункте приема и контрольный сигнал уровня излучаемой мощности. Запись этих сигналов осуществлялась при непрерывном автоматическом изменении частоты генератора. Поскольку частотная зависимость выходной мощности ЛОВ представляет собой ряд острых, различных по величине пиков, то на ленте самописца приемника записывалась определенного вида «спектрограмма». После нескольких повторных записей приемник и измеритель мощности передатчика вновь калибровались.

Для получения на той или иной волне необходимых данных о зависимости сигнала от влажности выбирался характерный пик (или другая особенность) спектрограмм. Всего в диапазоне $0,71 \div 0,76$ мм, где проводились измерения, было выбрано 10 длин волн.

Измерения абсолютной влажности проводились аспирационными

психрометры во время записи сигналов в двух пунктах — вблизи передатчика и приемника на высоте трассы сигнала. Для повышения точности в каждом из пунктов измерения выполнялись двумя психрометрами. Обычное отклонение средних значений влажности в каждом из пунктов от общего среднего (по обоим пунктам) значения составляло $2 \div 3\%$.

ОБРАБОТКА ДАННЫХ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

В рассматриваемом окне прозрачности ослабление интенсивности монохроматического излучения может быть описано выражением

$$I = I_0 \exp [-(\Gamma_{вп} + \Gamma_k) R]. \quad (1)$$

Здесь I_0 — интенсивность в отсутствие поглощения, $\Gamma_{вп}$ и Γ_k — коэффициенты поглощения водяного пара и кислорода, R — расстояние между передатчиком и приемником. Поскольку всюду в этом окне за исключением узкого ($\sim 0,1 \text{ см}^{-1}$) участка вблизи $14, 17 \text{ см}^{-1}$ [2, 3] кислородное поглощение много меньше, чем поглощение водяным паром, то при измерениях методом вариации влажности незначительными изменениями величины Γ_k при изменениях парциального давления H_2O (а также температуры и давления воздуха) можно пренебречь. Тогда, принимая во внимание механизм поглощения димерами $(\text{H}_2\text{O})_2$ [5], (1) можно записать в виде

$$\ln I = a - [\Gamma_m(\rho) + \Gamma_d(\rho)] R = a - [\gamma_m(\rho)\rho + \gamma_d(\rho)x\rho^2] R, \quad (2)$$

где $a = \ln I_0 - \Gamma_k R$, Γ_m и Γ_d — коэффициенты поглощения мономеров и димеров водяного пара, γ_m и γ_d — те же коэффициенты, отнесенные к единичной плотности мономеров и димеров соответственно, x — фактор, определяющий концентрацию димеров. Зависимость γ_m и γ_d от ρ обусловлена изменением ширины спектральных линий мономеров и димеров водяного пара при изменении его плотности вследствие больших сечений соударений этих молекул между собой, нежели с молекулами сухого воздуха.

Чтобы установить вид функции, которая может быть принята в качестве аппроксимирующей при обработке измерений методом вариации влажности, отметим следующее. Вдали от резонансных частот линий мономеров (в окнах прозрачности) функция $\gamma_m(\rho)$ линейна: $\gamma_m(\rho) = \gamma_m(0)(1 + s\rho)$. Зависимость $\gamma_d(\rho)$ в диапазоне $\lambda < 2 \text{ мм}$ при нормальном атмосферном давлении согласно [5] очень слаба, и ею можно пренебречь. Таким образом, зависимость $\ln I(\rho)$ имеет квадратичный характер:

$$\ln I = a + b\rho + c\rho^2, \quad (3)$$

где $b = -\gamma_m(0)R$, $c = c_1 + c_2$, $c_1 = sb$, $c_2 = -\gamma_d xR$.

Использование (3) в качестве аппроксимирующей функции при обработке экспериментальных данных позволяет по найденным значениям b и c определить суммарный коэффициент поглощения водяного пара для любой влажности ρ :

$$\Gamma_{вп}(\rho) = \Gamma_m + \Gamma_d = -\frac{1}{R}(b\rho + c\rho^2). \quad (4)$$

Большой интерес представляет раздельное определение коэффициентов Γ_m и Γ_d . Строго говоря, метод вариации влажности не позволяет это сделать только на основе опытных данных из-за наличия мономерной составляющей в квадратичном члене (3), обусловленной фактором

s , величина которого должна быть задана дополнительно. Здесь мы воспользовались расчетными сведениями [10] о самоуширении линий H_2O . Заметим, что эти расчеты хорошо согласуются с данными измерений [6, 11–13] в резонансных областях линий. Что касается большей величины самоуширения, полученной в [12, 13] по измерениям в окнах, то можно подозревать, что это обусловлено вкладом димеров.

Выражение (3) пригодно для обработки тех измерений, в процессе которых температура T и давление сухого воздуха P остаются постоянными. Остановимся на более общем случае, когда при измерениях имеют место отклонения этих метеопараметров от их средних значений $T_{\text{ср}}$ и $P_{\text{ср}}$. Изменения T и P могут носить либо случайный характер, либо обнаруживать кроме того еще некоторый систематический ход с изменением влажности. Если в первом случае будет просто увеличен разброс точек на графике зависимости $\ln I(\rho)$, т. е. увеличена случайная ошибка измерений, то во втором может быть изменен в какой-то мере сам характер этой зависимости, что поведет к появлению систематической ошибки. Чтобы исключить указанные ошибки, необходимо ввести в аппроксимирующую функцию соответствующие зависимости от T и P .

В окнах прозрачности

$$\gamma_m(\rho, T, P) = kf(T)(P + \sigma_{\text{эфф}} P_{\text{H}_2\text{O}}), \quad (5)$$

где k — некоторый коэффициент, $\sigma_{\text{эфф}} = \frac{\Delta\nu_{\text{эфф}}^{\text{H}_2\text{O}-\text{H}_2\text{O}} - \text{H}_2\text{O}}{\Delta\nu_{\text{эфф}}^{\text{H}_2\text{O}-\text{H}_2\text{O}} - \text{сух. воз.}}$ — эффективные полуширины линий мономеров, обусловленные соударениями $\text{H}_2\text{O} - \text{H}_2\text{O}$ и $\text{H}_2\text{O} - \text{сухой воздух}$. Введение эффективных значений вызвано тем, что ширины линий для разных квантовых переходов различны. Слабой температурной зависимостью $\sigma_{\text{эфф}}(T)$ [10] здесь пренебрегаем. Записав аналогичное (5) выражение для $\rho = 0$, $T_{\text{ср}}$, $P_{\text{ср}}$ и перейдя от давления $P_{\text{H}_2\text{O}}$ к влажности ρ по формуле $P_{\text{H}_2\text{O}}$ (мм рт. ст.) = $3,46 \cdot 10^{-3} T \rho$ (г/м³) [14], находим

$$\gamma_m(\rho, T, P) = \gamma_m(0, T_{\text{ср}}, P_{\text{ср}}) \frac{P f(T)}{P_{\text{ср}} f(T_{\text{ср}})} \left(1 + 3,46 \cdot 10^{-3} \sigma_{\text{эфф}} \frac{T}{P} \rho \right). \quad (6)$$

Согласно расчетам [10] для наиболее интенсивных вращательных ij -переходов величина параметра σ_{ij} лежит в пределах от 4,5 до 6. Воспользуемся в качестве $\sigma_{\text{эфф}}$ указанным в [10] средним взвешенным по интенсивности значением, равным 5,5. Температурная зависимость для длинноволновых субмиллиметровых окон прозрачности согласно [5] выражается как $f(T) \sim T^{-2,5}$.

Для димерного члена в (3) должна быть учтена только температурная зависимость, поскольку при обычных атмосферных условиях зависимостью γ_d от P можно пренебречь [5]. Согласно [5]

$$\gamma_d(\rho, T, P) \times (T) = \gamma_d(0, T_{\text{ср}}, P_{\text{ср}}) \times (T_{\text{ср}}) \left(\frac{T}{T_{\text{ср}}} \right)^m, \quad (7)$$

причем для исследованного окна прозрачности в интервале температур $243 \div 300^\circ\text{K}$ показатель $m = 10,7$.

Таким образом, подставляя (6) и (7) в (2), в случае изменяющихся T и P имеем аппроксимирующую функцию вида

$$\ln I = a + b \frac{P}{P_{\text{ср}}} \left(\frac{T}{T_{\text{ср}}} \right)^{-2,5} \rho + \left[c_1 \left(\frac{T}{T_{\text{ср}}} \right)^{-1,5} + c_2 \left(\frac{T}{T_{\text{ср}}} \right)^{-10,7} \right] \rho^2, \quad (8)$$

переходящую в (3) при $T = T_{\text{ср}}$ и $P = P_{\text{ср}}$. Задаваемая нами при обработке величина s , входящая в c_1 ($c_1 = sb$), определяется выбранным

выше значением $\sigma_{\text{эфф}}$: $s = 3,46 \cdot 10^{-3} \sigma_{\text{эфф}} \frac{T_{\text{ср}}}{P_{\text{ср}}}$. Остальные параметры a ,

b , c_2 отыскиваются по экспериментальным данным методом наименьших квадратов.

Результаты обработки измерений приведены на рис. 3 и 4. Сплошными кривыми на них показаны расчетные данные. Расчет мономерного поглощения выполнялся по формуле (6) работы [15] с использованием,

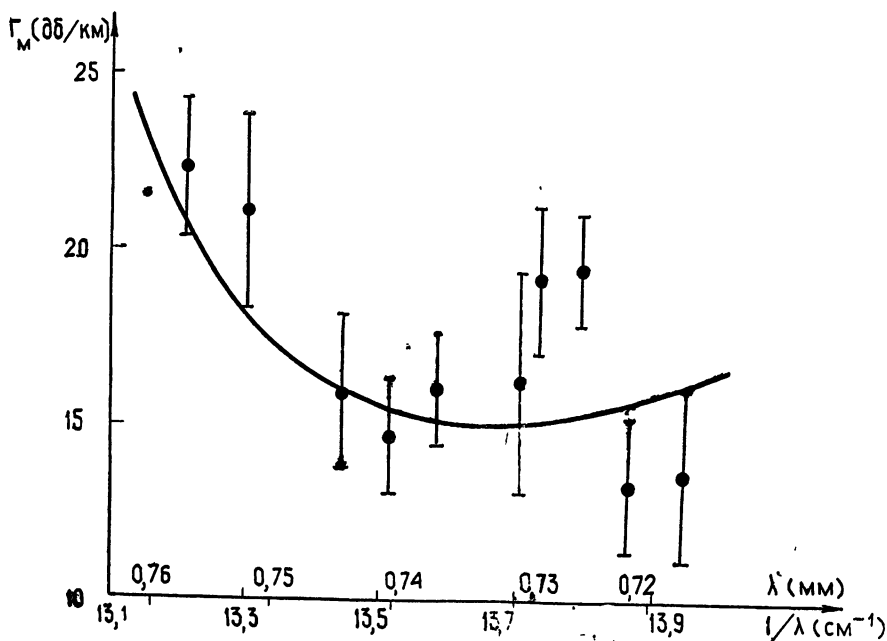


Рис. 3 Экспериментальные (кружки) и теоретические (сплошная линия) значения коэффициента поглощения мономеров H_2O для $\rho = 7,5 \text{ г/м}^3$, $T_{\text{ср}} = 282^\circ\text{К}$, $P_{\text{ср}} = 750 \text{ мм рт. ст.}$ Вертикальные отрезки — среднеквадратичные ошибки измеренных значений.

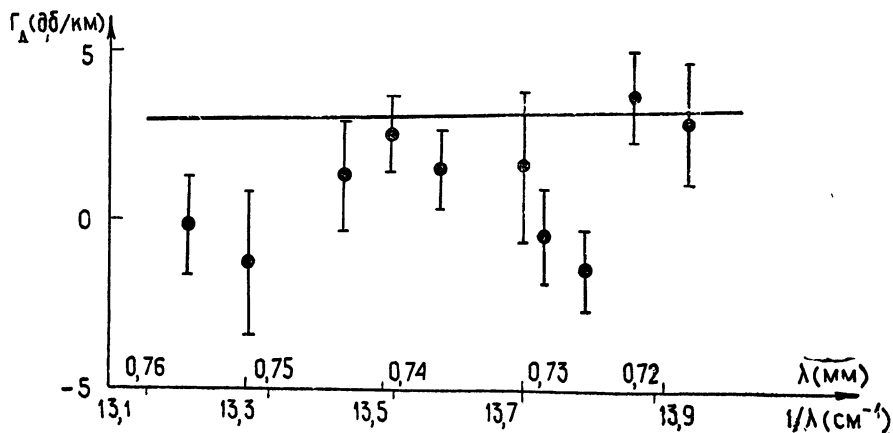


Рис. 4. Экспериментальные (кружки) и теоретические (сплошная линия) значения коэффициента поглощения димеров $(\text{H}_2\text{O})_2$ для $\rho = 7,5 \text{ г/м}^3$, $T_{\text{ср}} = 282^\circ\text{К}$, $P_{\text{ср}} = 750 \text{ мм рт. ст.}$ Вертикальные отрезки — среднеквадратичные ошибки измеренных значений.

за исключением пяти линий H_2O , теоретических полуширин, вычисленных Бенедиктом и Капланом [19, 16], причем, согласно их указанию [10], полученные в [16] значения $\Delta\nu_{H_2O-N_2}$ были приняты нами как $\Delta\nu_{H_2O-сух. возд}$ К условиям эксперимента теоретические полуширины пересчитывались по формуле

$$\Delta\nu_{H_2O-возд.}(\rho, T, P) = \left[\Delta\nu_{H_2O-сух. возд.} \frac{P}{760} + \Delta\nu_{H_2O-H_2O} \frac{P_{H_2O}}{760} \right] \left(\frac{T}{300} \right)^{-n}. \quad (9)$$

Для пяти же наиболее интенсивных длинноволновых линий $\lambda = 1,63; 0,92; 0,789; 0,538$ и $0,398$ мм на основании наших измерений их параметров* взяты значения $\Delta\nu_{H_2O-возд.}$, соответственно равные (для $\rho = 7,5$ г/м³, $T = T_{ср} = 282^\circ K$, $P = P_{ср} = 750$ мм рт. ст.): 0,106; 0,105; 0,106; 0,110 и 0,110 см^{-1**}.

Расчетные данные для димерного поглощения заимствованы из [5].

Прежде чем переходить к выводам из сопоставления полученных результатов с расчетными, необходимо отметить следующее. Изложенный выше стандартный способ, которым мы воспользовались для раздельного определения коэффициентов Γ_m и Γ_d , может быть успешно применен для обработки высокоточных измерений, т. е. в том случае, когда квадратичная зависимость $\ln I(\rho)$ надежно устанавливается экспериментом и все параметры (3) могут быть определены с достаточной точностью. В противном же случае, к которому мы относим и настоящие измерения (см. рис. 1)***, точность экспериментальных значений Γ_m и Γ_d оказывается невысокой. Тем не менее, из рассмотрения рис. 3 и 4 могут быть сделаны выводы: 1) измеренное мономерное поглощение в пределах экспериментальных ошибок, оцениваемых в $\pm 20\%$, совпадает с теоретическим; 2) найденная из опыта величина димерного поглощения примерно в 2 ÷ 3 раза меньше расчетных данных и составляет в окне 0,73 мм при условиях, близких к нормальным атмосферным ($\rho \sim 7,5$ г/м³, $T \sim 293^\circ K$), 5 ÷ 10% от мономерного поглощения.

Если для повышения точности раздельного определения мономерного и димерного поглощения требуется проведение измерений в значительно большем интервале влажности (что может быть реализовано в лабораторных условиях), то нахождение с хорошей точностью суммарного коэффициента поглощения водяного пара возможно и на основе данных настоящего эксперимента. Однако для этого должен быть применен иной способ обработки. Суть его сводится к уменьшению числа искоемых независимых параметров в (3) путем задания одного из них с использованием, например, расчетных значений.

Можно показать, что при задании коэффициента $b = B_0$ или $c = C_0$, когда вместо (3) имеем

$$\ln I = A + B_0 \rho + C \rho^2 \quad (10a)$$

или

$$\ln I = A + B \rho + C_0 \rho^2, \quad (10б)$$

отношение среднеквадратичных ошибок $\bar{\epsilon}_c$ и $\bar{\epsilon}_{C_0}$ значений c и C_0 коэффи-

* Параметры первых четырех линий содержатся в [9, 17, 18], результаты исследования линии $\lambda = 0,398$ мм направлены в печать [23].

** Указанные значения отличаются от вычисленных с помощью (9) и теоретических данных [10, 16] не более чем на $\pm 7\%$.

*** Нужно подчеркнуть, здесь, что разброс данных в эксперименте, выполняемом в полевых условиях, определяется не только аппаратными ошибками, но и в значительной степени иными факторами, например, неточностью определения влажности из-за неоднородного распределения ее вдоль трассы, флуктуациями сигнала, рефракцией, присутствием в воздухе гидрометеоров и других взвешенных частиц.

циентов в (3) и (10 а) или отношение $\bar{\epsilon}_b$ и $\bar{\epsilon}_B$ значений \bar{b} и \bar{B} коэффициентов в (3) и (10 б), найденных при обработке данных методом наименьших квадратов, равно

$$\frac{\bar{\epsilon}_c}{\bar{\epsilon}_c} = \frac{\bar{\epsilon}_b}{\bar{\epsilon}_B} = \sqrt{60} \frac{\epsilon_0}{\epsilon'_0} \left[\frac{4}{15} + \frac{\rho_1}{\rho_2 - \rho_1} + \left(\frac{\rho_1}{\rho_2 - \rho_1} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (11)$$

где ϵ_0 и ϵ'_0 — среднеквадратичные ошибки на единицу веса соответственно при аппроксимации функциями (3) и (10 а, б), ρ_1 и ρ_2 — граничные значения влажности при измерениях. Если разброс экспериментальных точек на графике $\ln I(\rho)$ превышает максимальное отклонение кривой (10 а) или (10 б) от кривой (3) в интервале $\rho_2 - \rho_1$, то $\epsilon_0 \approx \epsilon'_0$.

Тогда, например, для случая $\rho_1/(\rho_2 - \rho_1) = 1$ имеем $\frac{\bar{\epsilon}_c}{\bar{\epsilon}_c} = \frac{\bar{\epsilon}_b}{\bar{\epsilon}_B} = 11,7$.

Покажем теперь, что пара значений B_0 и \bar{C} (или \bar{B} и C_0), одно из которых задано, а другое определено по экспериментальным данным, дает истинный суммарный коэффициент поглощения $\Gamma_{в.п.}$ для некоторой влажности ρ^* и что неточность задания параметра B_0 (или C_0) не влечет за собой появления систематической ошибки в величине $\Gamma_{в.п.}(\rho^*)$. Пусть задан параметр C_0 . Будем считать, что ход экспериментальных точек в интервале от ρ_1 до ρ_2 точно соответствует истинной кривой вида (3), т. е. систематические ошибки отсутствуют (случайный разброс для простоты исключаем из рассмотрения), и найдем интеграл квадратов отклонений точек аппроксимирующей кривой (10 б) от кривой (3):

$$L = \int_{\rho_1}^{\rho_2} [a - A + (b - B)\rho + (c - C_0)\rho^2]^2 d\rho. \quad (12)$$

Соответствующее условию его минимума $\left(\frac{\partial L}{\partial A} = 0 \text{ и } \frac{\partial L}{\partial B} = 0 \right)$ значение

$$\bar{B} = b + (c - C_0)(\rho_1 + \rho_2). \quad (13)$$

Отсюда на основании (4) получаем

$$-\frac{1}{R} (\bar{B}\rho^* + C_0\rho^{*2}) = \Gamma_{в.п.}(\rho^*), \quad (14)$$

где $\rho^* = \rho_1 + \rho_2$. Очевидно, что с изменением параметра C_0 изменился и значение \bar{B} , соотношение же (14) всегда будет давать суммарный коэффициент $\Gamma_{в.п.}(\rho^*)$. При этом ошибка значения $\Gamma_{в.п.}(\rho^*)$ будет определяться случайной погрешностью лишь одного коэффициента \bar{B} .

Аналогичное (14) выражение получается и в случае задания параметра B_0 : $-\frac{1}{R} (B_0\tilde{\rho}^* + \bar{C}\tilde{\rho}^{*2}) = \Gamma_{в.п.}(\tilde{\rho}^*)$, где $\tilde{\rho}^* = \rho^* \left[1 + \frac{1}{15} \left(\frac{\Delta\rho}{\rho^*} \right)^2 \right]$.

Поскольку всегда $\Delta\rho \ll \rho^*$, то $\tilde{\rho}^* \approx \rho^*$.

* В частности, можно принять и значение $C_0 = 0$, т. е. использовать линейную аппроксимирующую функцию $\ln I = A + B\rho$. Именно такого вида функция использовалась и ранее при обработке измерений методом вариации влажности, но при этом из-за неучета димерного поглощения и пренебрежения эффектом самоуширения линий мономеров H_2O неправильно полагалось, что коэффициент \bar{B} позволяет определить поглощение для любой влажности как $\Gamma = -\frac{1}{R} \bar{B}\rho$.

Результаты обработки рассмотренным способом приведены на рис. 5. Здесь же даны расчетные значения Γ_m и $\Gamma_{вп} = \Gamma_m + \Gamma_d$ (расчет Γ_m выполнялся так же, как и для рис. 3, данные для Γ_d взяты согласно [5]). Вертикальные отрезки дают среднеквадратичную погрешность $\Gamma_{вп}$. Для иллюстрации уменьшения случайной ошибки, который дает второй способ в сравнении со стандартным, на рис. 5 пунктирными отрезками показаны также среднеквадратичные ошибки для двух значений $\Gamma_{вп}$, найденные по данным рис. 3 и 4.

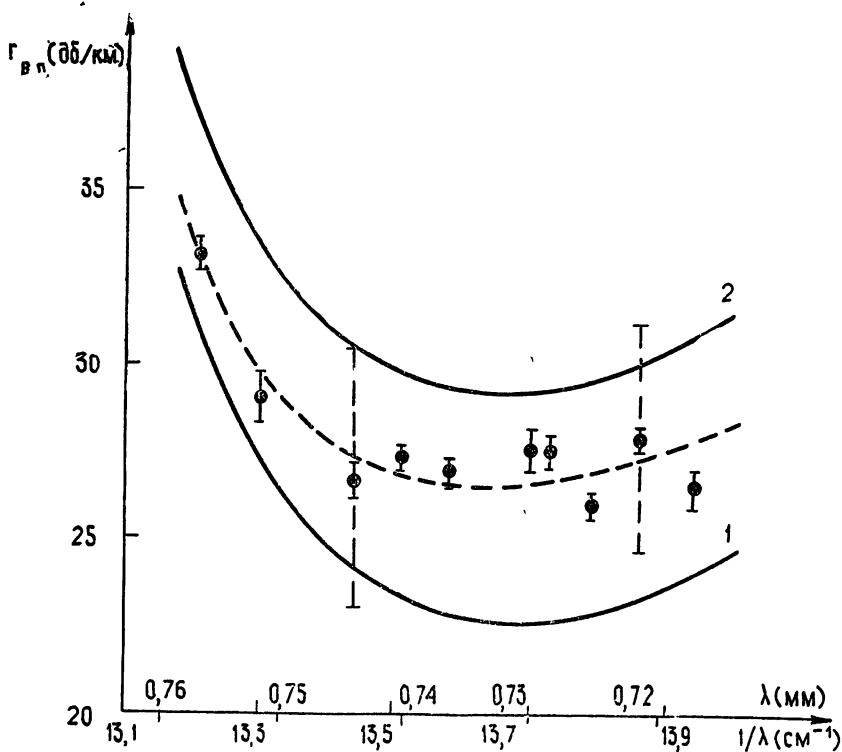


Рис. 5. Сравнение результатов эксперимента с расчетами поглощения в атмосферных парах воды. Кружки и кривая 2 — соответственно экспериментальные и расчетные значения суммарного коэффициента поглощения водяного пара. Кривая 1 — расчет для мономеров H_2O . Пунктирная кривая аппроксимирует ход экспериментальных точек. Все данные относятся к $p^*_{д} = 11$ г/м³, $T_{ср} = 282$ °К, $P_{ср} = 750$ мм рт. ст.

Как видно из рис. 5, измеренное поглощение превышает примерно на 15% расчетное для мономеров*, но вместе с тем несколько (на ~10%) меньше расчетного суммарного. Это обстоятельство приводит к тому же выводу, который вытекает и из рис. 4, т. е. что расчетные коэффициенты [5] поглощения димеров должны быть уменьшены примерно в два раза. Разумеется, к такому выводу мы приходим здесь, опираясь на то сделанное на основании рис. 3 заключение, что истинное мономерное поглощение близко в этом окне к расчетному.

* В литературе многократно отмечалось, что измеренные в окнах прозрачности коэффициенты поглощения водяного пара в 1,3—2 раза превышают расчетные для мономеров. Полученный здесь иной результат объясняется использованием в расчете больших ширин линий в соответствии с ревизией [10] их расчетных значений [16], подтвержденной экспериментом, а также большего значения дипольного момента согласно измерениям [19]. Все это привело к увеличению прежних данных [1] для мономеров в окнах прозрачности примерно в 1,2 раза.

В заключение проведем сопоставление полученных данных с результатами других измерений. Из них как наиболее надежные, по нашему мнению, следует выделить измерения [20] и [21], выполненные при сравнительно больших (сотни метров) базовых расстояниях и давшие близкие результаты. Что касается остальных работ, данные которых содержатся в обзорной таблице в [4], то их результаты не могут претендовать на высокую точность по ряду причин, уже отмечавшихся ранее в [1, 20, 22].

Прямое сравнение имеющихся экспериментальных данных затруднено ввиду того, что значения суммарного коэффициента поглощения $\Gamma_{\text{вп}}$ в разных экспериментах были определены для различных метеоусловий. Поэтому все данные должны быть предварительно приведены к каким-либо одним, например, стандартным условиям. Но здесь возникает та трудность, что для пересчета величины $\Gamma_{\text{вп}}$ от одних значений ρ , T , P к другим, очевидно, необходимо точное знание мономерной и димерной составляющих порознь и их зависимостей от ρ , T и P . Этот пересчет здесь выполним в предположении, что мономерное поглощение равно теоретическому, а разность $\Gamma_{\text{вп}}^{\text{экс}} - \Gamma_{\text{м}}^{\text{теор}}$ есть димерное поглощение.

В настоящих измерениях минимальное в окне значение $\Gamma_{\text{вп}}^{\text{экс}} = (26,5 \pm 1,5) \text{ дб/км}$. Оно относится к $\rho = 11 \text{ г/м}^3$, $T = 282^\circ\text{К}$, $P = 750 \text{ мм рт. ст.}$ Воспользовавшись выражениями, аналогичными (6) и (7), для стандартных метеоусловий ($\rho_0 = 7,5 \text{ г/м}^3$, $T_0 = 293^\circ\text{К}$, $P_0 = 750 \text{ мм рт. ст.}$ *) получим $\Gamma_{\text{вп}} = 16,3 \text{ дб/км}$.

В работе [20] для стандартных условий указано значение $\Gamma_{\text{вп}} = (17,8 \pm 2) \text{ дб/км}$. Оно было получено в свое время при обработке, не учитывавшей димерный механизм поглощения, т. е. с использованием линейной функции $\ln I(\rho)$. Согласно изложенному выше, экспериментальный результат [20] нужно отнести не к $\rho_0 = 7,5 \text{ г/м}^3$, а к $\rho = \rho^* = 12,5 \text{ г/м}^3$, так что $\Gamma_{\text{вп}}(\rho^*) = \frac{17,8}{7,5} \cdot 12,5 = 29,6 \text{ дб/км}$. Сделав теперь

обратный пересчет этой величины к ρ_0 , но уже с учетом вклада димеров (и введя на основании (6) и (7) небольшие поправки на влияние T и P , которые при измерениях были близки к стандартным), приходим к значению $16,2 \text{ дб/км}$, весьма близкому к полученному в настоящих измерениях.

В несколько худшем согласии оказывается результат работы [21], авторы которой дают приведенное к стандартным условиям значение $\Gamma_{\text{вп}} = 19,8 \text{ дб/км}$. Но, к сожалению, в [21] не указано, в каких предположениях проводился пересчет экспериментальных данных к нормальным условиям.

Авторы благодарны А. В. Поварову и Н. И. Шашкину за помощь, оказанную при проведении и обработке измерений, М. Б. Зиничевой, проводившей расчеты на ЭВМ, и С. А. Жевакину за обсуждение материалов статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. А. Жевакин, А. П. Наумов, Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика, 6, № 4, 674 (1963).
2. А. Г. Кисляков, К. С. Станкевич, Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика, 10, № 9—10, 1244 (1967).
3. H. A. Gebbie, W. J. Burroughs, G. R. Bird, Proc. Roy. Soc., ser. A, 310, 579 (1969).
4. Р. А. Валитов, С. Ф. Дюбко, В. В. Камышан, В. М. Кузьмичев, В. И. Макаренко, А. В. Соколов, В. П. Шейко, Техника субмиллиметровых волн, изд. Сов. радио, М., 1969.
5. А. А. Викторова, С. А. Жевакин, Докл. АН СССР, 194, 540 (1970).

* При нормальном атмосферном давлении 760 мм рт. ст. и $\rho = \rho_0$, $T = T_0$ давление сухого воздуха $P_0 \approx 750 \text{ мм рт. ст.}$

6. J. E. Becker, S. H. Autler, *Phys. Rev.*, **70**, 300 (1946).
7. J. H. McCoy, D. B. Rensch, R. K. Long, *Appl. Opt.*, **8**, 1471 (1969).
8. М. Б. Голант, Р. Л. Виленская, Е. А. Зюлина, З. Ф. Каплун, А. А. Негирев, В. А. Париков, Т. Б. Реброва, В. С. Савельев, *ПТЭ*, № 4, 136 (1965).
9. В. Я. Рядов, Н. И. Фурашов, *Оптика и спектроскопия*, **24**, 186 (1968).
10. W. S. Benedict, L. D. Kaplan, *JQSRT*, **4**, 453 (1964).
11. J. R. Rusk, *J. Chem. Phys.*, **42**, 493 (1965).
12. L. Frenkel, *J. Mol. Spectr.*, **26**, 227 (1968).
13. D. E. Burch, *JOSA*, **58**, 1383 (1968).
14. А. Х. Хргиан, *Физика атмосферы*, Физматгиз, М., 1958.
15. С. А. Жевакин, А. П. Наумов, *Изв. высш. уч. зав.—Радиофизика*, **10**, № 9—10, 1213 (1967).
16. W. S. Benedict, L. D. Kaplan, *J. Chem. Phys.*, **30**, 388 (1959).
17. В. Я. Рядов, Н. И. Фурашов, *Изв. высш. уч. зав.—Радиофизика*, **9**, № 6, 1073 (1966).
18. В. Я. Рядов, Н. И. Фурашов, Доклад на VIII Всесоюзной конференции по распространению радиоволн, Ашхабад, 14—20 апреля 1967 г.
19. M. Lichtenstein, V. Derr, J. Gallagher, *J. Mol. Spectr.*, **20**, 391 (1966).
20. В. Я. Рядов, Г. А. Шаронов, *Радиотехника и электроника*, **11**, 1037 (1966).
21. К. А. Аганбекян, А. Ю. Зражевский, М. А. Колосов, А. В. Соколов, *Тр. IX Всесоюзной конференции по распространению радиоволн*, Харьков, 23—28 июня 1969 г.
22. В. Я. Рядов, Н. И. Фурашов, Г. А. Шаронов, *Радиотехника и электроника*, **9**, 943 (1964).
23. В. Я. Рядов, Н. И. Фурашов, *Оптика и спектроскопия* (в печати).

Научно-исследовательский радиофизический институт

Поступила в редакцию
14 января 1972 г.

INVESTIGATION OF RADIO WAVE ABSORPTION IN ATMOSPHERIC TRANSPARENT WINDOW $\lambda=0.73$ mm

V. Ya. Ryadov, N. I. Furashov

Using a source of monochromatic radiation the atmospheric water vapour absorption coefficient has been measured in the band of $0.71 \div 0.76$ mm. The measurements were made by the method of varying humidity, the distance between transmitter and receiver being 1.58 km. The methods are applied in data processing which take into account the nonlinear dependence of the water vapour absorption coefficient versus the humidity. This enables one to obtain in addition to the total absorption coefficient, tentative data on H_2O vapour absorption by monomers and dimers separately. The total absorption coefficient under standard atmospheric conditions ($\rho = 7.5$ g/m³, $T=293$ °K, $P=760$ mm Hg) is equal to 16.3 db/km. The results obtained are compared with theoretical calculations and data of other measurements.