

УДК 621.371.246 543.42 062

## ПОГЛОЩЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ВОДЯНЫМ ПАРОМ В ОКНАХ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ПРОЗРАЧНОСТИ ДИАПАЗОНА 95 ÷ 145 мкм

*Б. А. Свердлов, Н. И. Фурашов*

Приведены результаты спектрометрических измерений и теоретического расчета коэффициента поглощения чистого и атмосферного водяного пара для шести субмиллиметровых окон относительной прозрачности. Во всех окнах измеренное поглощение превышает расчетное; для чистых паров воды расхождение существенно больше, чем для атмосферного водяного пара.

Неоднократно отмечалось (см., например, обзоры [1-3]), что в диапазоне миллиметровых и субмиллиметровых волн измеренные коэффициенты поглощения атмосферного водяного пара в участках между его спектральными линиями — окнами относительной прозрачности — заметно (до 1,5—2 раз) превышают значения, рассчитанные теоретически для мономеров  $H_2O$ . Измерения [4-6] поглощения в чистых парах воды, проведенные в ряде окон прозрачности диапазона  $\lambda \geq 350$  мкм, выявили еще большее превышение эксперимента над расчетом: на волнах  $\lambda = 350$  и 450 мкм данные расходятся примерно в 2 раза, а в более длинноволновых окнах — в 4—5 раз.

Для коротковолновых субмиллиметровых окон прозрачности ( $\lambda < 350$  мкм) экспериментальных данных о поглощении в чистом водяном паре, которые позволяли бы с определенностью судить о степени соответствия теории эксперименту, пока недостаточно. В указанной спектральной области поглощение в чистых парах  $H_2O$  измерялось на нескольких частотах при помощи лазеров [7-11], однако эти частоты приходится преимущественно на склоны окон, где соотношение между экспериментальными и расчетными данными может быть иным, чем в центральных участках окон, и где оно в гораздо большей степени, чем в центрах окон, зависит от точности используемых в расчете резонансных частот ближайших спектральных линий. Что касается непрерывных по спектру, спектрометрических измерений, то они были выполнены лишь в окне  $\lambda = 290$  мкм [5].

В настоящей работе содержатся результаты теоретического расчета и спектрометрических измерений поглощения в чистых парах воды в окнах прозрачности, центрированных к  $\lambda = 97,1; 102,8; 105,6; 110,3; 118,9$  и  $142,3$  мкм. Приведены также данные, уточняющие соотношение между расчетом и экспериментом в этих окнах для смеси  $H_2O +$  воздух.

### АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения выполнялись на эшелеттном вакуумном спектрометре [12, 13] с источником излучения — ртутной лампой ДРТ-220 и пневматическим детектором типа ОАП-5М. При подготовке измерений особое внимание было обращено на подбор оптимальной комбинации фильтров, обеспечивающей необходимую спектральную чистоту посту-

пающего на приемник излучения (устранение высших порядков спектра дисперсионного эшелетта и рассеянного излучения) при возможно меньшей потере полезного сигнала. При этом наряду с ранее применявшимися фильтрами [12, 14] использовались описанные в [15] и любезно предоставленные нам авторами этой работы комбинированные фильтры на полиэтиленовой основе.

С целью смещения границы насыщения водяного пара в область его повышенных давлений вакуумная камера спектрометра была снабжена системой электроподогрева. Контроль температуры осуществлялся четырьмя термopарами, расположенными в разных местах камеры и предварительно проградуированными по ртутному термометру с точностью не хуже 0,5 К. Как показали испытания, при  $T=310 \div 315$  К отклонение температуры в различных точках объема, занимаемого потоком излучения, от ее среднего значения не превышало 3 К.

Поглощение определялось путем сравнения спектрограмм, зарегистрированных сначала в заполненной исследуемым газом камерой спектрометра, а затем в «вакууме» (остаточное давление  $\sim 0,1$  Тор). Для уменьшения случайной ошибки измерений запись спектрограмм повторялась 2—3 раза. Кроме того, до и после их записи производился контроль чувствительности приемного устройства путем регистрации калибровочного сигнала.

Измерения в чистых парах воды выполнялись при давлениях  $P_{H_2O} = 17 \div 20$  Тор. Средняя температура в камере спектрометра при этом поддерживалась на уровне  $310 \pm 1$  К, так что относительная влажность  $r$  в ней не превышала 55%. На основании результатов исследования [16] можно полагать, что при таких низких значениях  $r$  поглощение излучения молекулами  $H_2O$ , адсорбированными на рабочих поверхностях оптических элементов спектрометра, несущественно. Заполнение камеры паром производилось через накататель из подогреваемой колбы с предварительно обезгаженной дистиллированной водой. Продолжительность заполнения до давления  $P_{H_2O} \sim 20$  Тор составляла около 30 минут. Давление контролировалось масляным манометром с точностью не хуже 1%.

Поглощение в воздухе измерялось при атмосферном давлении и температуре  $T=297 (\pm 2)$  К. Абсолютная влажность воздуха  $\rho$  в камере спектрометра в разных сериях измерений составляла  $3,7 \div 7,3$  г/м<sup>3</sup> ( $r=17 \div 34\%$ ). Она измерялась непосредственно перед герметизацией спектрометра над его плитой (при поднятой его крышке) тремя аспирационными психрометрами типа М-34\*. При достаточно близких показаниях психрометров в последовательных 3—4 замерах (разброс  $\leq 6\%$ ) спектрометр герметизировался. С целью уменьшения влияния адсорбции, которая, вообще говоря, может привести к неконтролируемым изменениям  $\rho$  в герметизированной камере спектрометра, заполнение ее воздухом производилось за несколько часов до измерений влажности.

Для всех исследованных окон прозрачности спектрограммы были получены при скорости сканирования  $4,1 \cdot 10^{-3}$  мкм/с и постоянной времени приемно-регистрирующего устройства  $\tau=30$  с. Спектральное разрешение в различных окнах составляло  $0,5 \div 0,85$  см<sup>-1</sup>.

В каждом из окон было проведено 4—7 независимых, т. е. с заново приготовленной газовой пробой, измерений поглощения. После приведения результатов этих измерений к одним условиям (для чис-

\* В соответствии с данными работ [17—20] психрометрический коэффициент  $A$  для психрометров М-34 мы приняли равным  $6,4 \cdot 10^{-4} (^\circ\text{C})^{-1}$  (вместо значения  $A=6,62 \cdot 10^{-4} (^\circ\text{C})^{-1}$ , использованного при составлении психрометрических таблиц [21]). Это привело к увеличению измеряемых значений  $\rho$  и соответственно к уменьшению экспериментальных значений коэффициента поглощения в табл. 2 на 2—5%.

того водяного пара — к среднему при измерениях давлению  $P_{H_2O} = 18,5 \text{ Тор}$ , а для воздуха — к стандартной влажности  $\rho = 7,5 \text{ г/м}^3$  и давлению сухого воздуха  $P = 750 \text{ Тор}$ ) они были усреднены.

### ПОГЛОЩЕНИЕ В ЧИСТЫХ ПАРАХ ВОДЫ

Полученные экспериментальные данные о поглощении в чистом водяном паре для шести окон относительной прозрачности диапазона  $\lambda = 95 \div 145 \text{ мкм}$  представлены на рис. 1 (кривые 1). Среднеквадратичные ошибки измеренных значений коэффициента поглощения  $\Gamma_{\text{эксп}}$  для центральных участков окон показаны на рис. 1 вертикальными отрезками. На склонах окон из-за уменьшения отношения сигнал/шум (вследствие более сильного поглощения излучения) они в 1,5—2 раза больше.

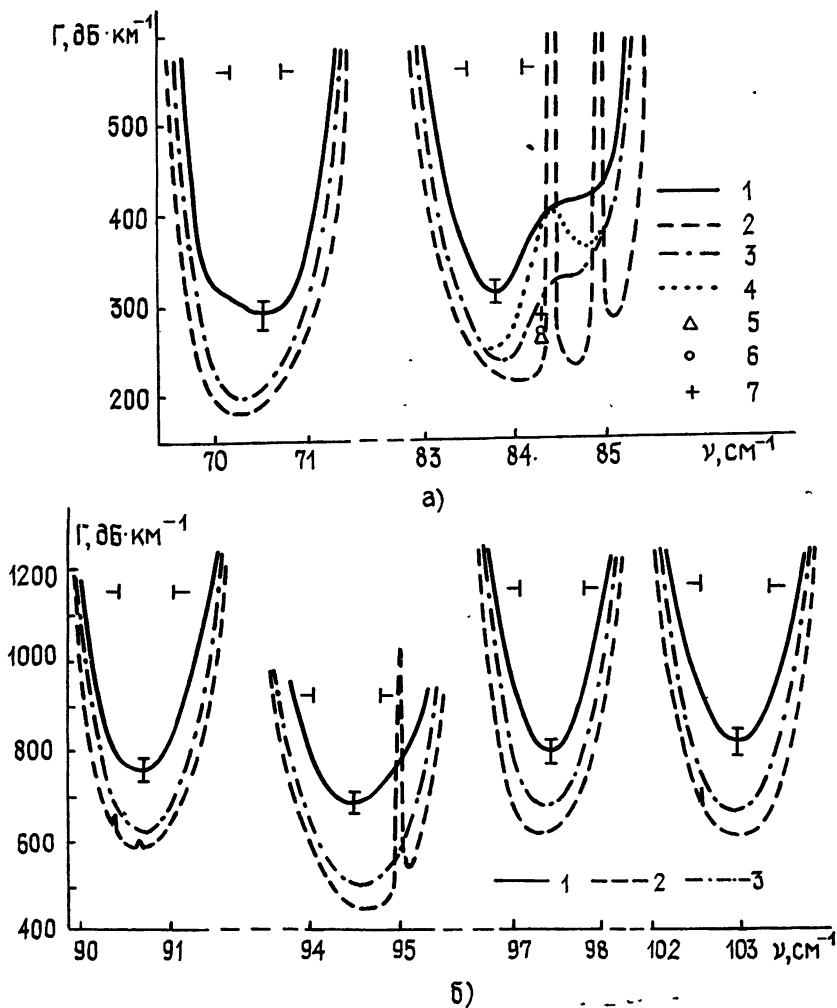


Рис. 1.

Соответствующее условиям эксперимента ( $P_{H_2O} = 18,5 \text{ Тор}$ ,  $T = 310 \text{ К}$ ) теоретическое спектральное распределение коэффициента поглощения  $\Gamma^{\text{теор}}(\nu)$  ( $\nu = 1/\lambda$  — волновое число) мономеров  $H_2O$  приведено на рис. 1 кривыми 2. Значения  $\Gamma^{\text{теор}}$  рассчитывались по методике работы [1] с формой линии по кинетическому уравнению. Как и

в [4], суммирование производилось по 871 переходу со значениями вращательного квантового числа  $J \leq 12$ . С целью уточнения расчетных данных дополнительно были учтены спектральные линии  $H_2O$  с  $12 \leq J \leq 18$ , приходящиеся на диапазон  $\lambda = 95 \div 145$  мкм. Однако для условий наших измерений их вклад в поглощение в исследованных участках спектра оказался несущественным. Расчеты выполнялись с полуширинами линий  $\Delta\nu_{J'}^{H_2O-H_2O}$  и их температурными показателями по Бенедикту и Каплану [22], интенсивности линий брались согласно [23, 24], энергетические термы и частоты переходов по [25, 26], дипольный момент молекулы  $H_2O$  был принят равным  $1,8546$  Д [27, 28].

Поскольку найденная из опыта величина  $\bar{\Gamma}_{\text{эксп}}$  представляет собой усредненное по полосе пропускания прибора поглощение, а коэффициентом  $\Gamma_{\text{теор}}$  определяется поглощение монохроматического излучения, то непосредственное сравнение значений  $\bar{\Gamma}_{\text{эксп}}$  и  $\Gamma_{\text{теор}}$  не позволяет получить точную количественную характеристику степени соответствия теории эксперименту. Для этой цели нужно располагать значениями  $\bar{\Gamma}_{\text{теор}}$  — теоретического коэффициента поглощения, усредненного по аппаратной функции спектрометра. Величина  $\bar{\Gamma}_{\text{теор}}$  может быть найдена при помощи выражения

$$\bar{\Gamma}_{\text{теор}}(\lambda) [\text{дБ/км}] = \quad (1)$$

$$= (4,34/L) \ln \left( \int_{\lambda-\Delta}^{\lambda+\Delta} A(\lambda-\lambda') d\lambda' / \int_{\lambda-\Delta}^{\lambda+\Delta} A(\lambda-\lambda') \exp[-(L/4,34)\Gamma_{\text{теор}}(\lambda')] d\lambda' \right),$$

где  $2\Delta$  — спектральный интервал, в котором аппаратная функция  $A(\lambda-\lambda') \neq 0$ , а  $L = 5,53 \cdot 10^{-3}$  км — длина оптического пути в спектрометре. В (1) использовано предположение, что спектральная плотность принимаемого излучения в отсутствие поглощения в пределах аппаратной функции не зависит от длины волны. Анализ спектрограмм показывает, что это предположение неплохо выполняется для всех исследованных окон. Функция  $A(\lambda-\lambda')$  определялась экспериментально методом, изложенным в [29, 30]. Ее ширина  $S$  (на уровне 0,5) для каждого окна указана в верхней части рис. 1. Погрешность значений  $\bar{\Gamma}_{\text{теор}}$ , обусловленная возможной неточностью определения контура  $A(\lambda-\lambda')$ , по нашим оценкам, не превышает 1—2%.

Таблица 1

Теоретические и экспериментальные значения коэффициента поглощения чистого водяного пара в окнах относительной прозрачности ( $P_{H_2O} = 18,5$  Тор,  $T = 310$  К)

Окна прозрачности		$S, \text{ см}^{-1}$	$\Gamma_{\text{теор}}, \text{ дБ} \cdot \text{ км}^{-1}$	$\bar{\Gamma}_{\text{теор}}, \text{ дБ} \cdot \text{ км}^{-1}$	$\bar{\Gamma}_{\text{эксп}}, \text{ дБ} \cdot \text{ км}^{-1}$	$\frac{\bar{\Gamma}_{\text{эксп}}}{\bar{\Gamma}_{\text{теор}}}$	$\Gamma_{\text{эксп}}, \text{ дБ} \cdot \text{ км}^{-1}$
$\lambda, \text{ мкм}$	$\nu, \text{ см}^{-1}$						
97,1	103	0,8	598	655	$800 \pm 25$	1,22	$735 \pm 30$
102,8	97,3	0,7	603	665	$785 \pm 25$	1,18	$720 \pm 30$
105,6	94,7	0,75	450	496	$680 \pm 20$	1,37	$625 \pm 25$
110,3	90,7	0,6	582	619	$750 \pm 25$	1,21	$710 \pm 30$
118,9	84,1	0,6	216	239	$315 \pm 15$	1,32	$290 \pm 20$
142,3	70,3	0,6	184	196	$290 \pm 15$	1,48	$275 \pm 20$

Сопоставление частотных зависимостей коэффициентов поглощения  $\bar{\Gamma}_{\text{эксп}}$  и  $\bar{\Gamma}_{\text{теор}}$  проводится на рис. 1 ( $\bar{\Gamma}_{\text{теор}}(\nu)$  — кривые 3), а их минимальных значений в окнах — в табл. 1. Видно, что качественно зависимости  $\bar{\Gamma}_{\text{эксп}}(\nu)$  и  $\bar{\Gamma}_{\text{теор}}(\nu)$  довольно близки друг к другу; некоторое несоответствие наблюдается лишь в окне  $\nu = 70,3 \text{ см}^{-1}$ , в котором ми-

нимум кривой  $\bar{\Gamma}_{\text{эксп}}(\nu)$  примерно на  $0,25 \text{ см}^{-1}$  смещен относительно минимума  $\bar{\Gamma}_{\text{теор}}(\nu)$ . В количественном отношении эксперимент не согласуется с расчетом: измеренные коэффициенты поглощения  $\Gamma_{\text{эксп}}$  всюду больше соответствующих значений  $\bar{\Gamma}_{\text{теор}}$ . Наибольшее расхождение имеет место в центральных участках окон, где оно составляет 18—48%; на склонах окон оно уменьшается до 10—20%.

Используя значения  $\bar{\Gamma}_{\text{эксп}}$  и выражение, аналогичное (1), для центров окон, вблизи которых поглощение меняется незначительно и где, следовательно, искажающее влияние прибора на результаты измерений сравнительно невелико, можно оценить и монокроматические коэффициенты поглощения  $\Gamma_{\text{эксп}}$ , характеризующие минимальное поглощение в окнах. Мы выполнили две оценки величины  $\Gamma_{\text{эксп}}$  соответственно в предположениях: 1)  $\Gamma(\nu) = k\Gamma_{\text{теор}}(\nu)$ , т. е. действительное распределение  $\Gamma(\nu)$  с точностью до постоянного коэффициента описывается теоретическим; 2)  $\Gamma(\nu) = \Gamma_{\text{теор}}(\nu) + \Delta\Gamma$  ( $\Delta\Gamma = \text{const}$ ). Результаты оказались не критичными к исходным предположениям: различие значений  $\Gamma_{\text{эксп}}$ , полученных в том и другом случаях, составило не более 5%. Таким образом, если не предполагать, что на спектральный интервал  $2\Delta$ , занимаемый аппаратной функцией, кроме линий поглощения, принадлежащих вращательному спектру  $\text{H}_2\text{O}$ , приходятся еще какие-либо линии (например, линии изотопозамещенных молекул воды или димеров  $(\text{H}_2\text{O})_2$ ), то найденные значения  $\Gamma_{\text{эксп}}$  можно считать достаточно надежными. Благодаря независимости от спектральных характеристик аппаратуры они могут быть использованы для сопоставления с другими данными. Значения  $\Gamma_{\text{эксп}}$  приведены в последнем столбце табл. 1.

Как уже отмечалось выше, поглощение в чистых парах  $\text{H}_2\text{O}$  в нескольких точках субмиллиметрового диапазона измерялось при помощи лазеров [7—11]. Наиболее обширное исследование — на семи субмиллиметровых лазерных частотах — выполнено в [11]. Поскольку три из них приходятся на исследованные нами окна  $\lambda = 97,1; 102,8$  и  $118,9 \text{ мкм}$ , то было бы полезно сравнить экспериментальные результаты, полученные в настоящей работе и в [11]. Однако сделать это, к сожалению, не представляется возможным, так как ни сами коэффициенты поглощения, ни точные значения частот, на которых они были измерены, в работе [11] не приведены.

Можно было бы попытаться провести сопоставление результатов в терминах «избыточного» поглощения  $\Gamma_{\text{эксп}} - \Gamma_{\text{теор}}$  (соответствующий график приведен в [11]), но для этого нужно иметь уверенность, что значения  $\Gamma_{\text{теор}}$ , полученные в [11] и нами, достаточно близки друг к другу. К сожалению, этой уверенности нет. Мы сравнили значения  $\Gamma_{\text{теор}}$  на лазерной частоте  $43,649 \text{ см}^{-1}$ , принадлежащей на склон линии  $\text{H}_2\text{O}$   $8_{4,5} - 9_{1,8}$  — единственной частоте, для которой данные расчета и эксперимента в [11] представлены в пригодной для количественного сопоставления графической форме. Оказалось, что вычисленный нами (для указанных в [11] значений  $P_{\text{H}_2\text{O}}$  и  $T$ ) коэффициент поглощения  $\Gamma_{\text{теор}}$  на этой частоте примерно в 3,5 раза превосходит значение, полученное в [11].

Вероятно, причина этого расхождения связана с различием использованных данных о частотах спектральных линий  $\text{H}_2\text{O}$  (в первую очередь, линии  $8_{4,5} - 9_{1,8}$ )\* и, возможно, с недостаточным количеством (346) учтенных в расчете [11] квантовых переходов. Так или ина-

\* Непосредственная проверка этого предположения затруднена тем, что мы не располагаем атласом, из которого авторами [11] брались резонансные частоты линий Косеиное же его подтверждение можно видеть в том, что если в расчете поглощения вместо использованных нами уточненных частот линий по [25, 26] принять старые (по [31]), то расхождение с 3,5 раз уменьшится до 1,5 раз.

че не исключена возможность того, что и для тех трех лазерных частот, которые приходятся на исследованные нами окна, разница в значениях  $\Gamma^{\text{теор}}$ , рассчитанных в настоящей работе и в работе [11], окажется значительной. Это означает, что сопоставление экспериментальных результатов этих двух работ на основе данных об избыточном поглощении не может быть проведено корректно.

Данные нашего исследования можно сравнить лишь с результатами лазерных измерений [8-10] на частоте  $\nu_{\text{л}} = 84,323 \text{ см}^{-1}$ . Результаты работ [8-10], пересчитанные к условиям наших измерений, показаны на рис. 1а значками 5-7 соответственно. Из данных рис. 1а следует, что полученные в [8-10] значения монохроматического коэффициента поглощения  $\Gamma^{\text{эксп}}$  превышают теоретическое на 15-25%. Превышение измеренного на спектрометре коэффициента поглощения  $\bar{\Gamma}^{\text{эксп}}$  над усредненным теоретическим  $\bar{\Gamma}^{\text{теор}}$  на  $\nu = \nu_{\text{л}}$  составляет около 28%. Небольшое различие результатов может быть объяснено тем, что при спектрометрических измерениях на частоте  $\nu_{\text{л}} = 84,323 \text{ см}^{-1}$ , которая приходится на склон линии  $\text{H}_2\text{O}$   $8_{4,4} - 9_{3,7}$  ( $\nu_{ij} \simeq 84,46 \text{ см}^{-1}$ ), «рассекающей» окно, центрированное к  $\lambda = 118,9 \text{ мкм}$ , из-за сравнительно большой ширины аппаратной функции существенный вклад в измеряемое поглощение дает центральная часть окна, где превышение эксперимента над расчетом больше, чем на частоте  $\nu_{\text{л}}$ .

Заканчивая обсуждение данных о поглощении в чистых парах воды, сделаем замечание по поводу объяснения избыточного поглощения на частоте  $\nu_{\text{л}} = 84,323 \text{ см}^{-1}$ , предложенного в [10]. Авторы [10] считают, что оно обусловлено изотопозамещенными молекулами  $\text{HDO}$ , имеющими спектральную линию поглощения с центром  $\nu_{ij} = 84,42 \text{ см}^{-1}$ . Такое заключение сделано ими на основе оценок вклада этой линии на  $\nu = \nu_{\text{л}}$ . Однако, как будет сейчас показано, полученные нами данные не подтверждают этот вывод.

Пользуясь данными рис. 5 работы [10], мы определили принятое в ней для линии  $\text{HDO}$  значение произведения силы на полуширину  $S_{ij}\Delta\nu_{ij}$  (оно оказалось равным  $4,4 \cdot 10^{-6} \text{ см}^{-3}$ ) и выполнили расчет частотной зависимости  $\bar{\Gamma}^{\text{теор}}(\nu)$  с учетом этой спектральной линии. Результаты расчета показаны на рис. 1а кривой 4. Видно, что она имеет четко выраженный максимум, вполне поддающийся обнаружению в эксперименте. Но на нашей экспериментальной кривой  $\bar{\Gamma}^{\text{эксп}}(\nu)$  этот максимум отсутствует. Это свидетельствует о том, что интегральная интенсивность линии  $\text{HDO}$  в действительности значительно меньше принятой в [10] и, следовательно, вклад этой линии недостаточен для объяснения им избыточного поглощения. Заметим, что даже если бы линия  $\text{HDO}$  была столь сильной, как это было принято в [10], то и тогда объяснить ее вкладом превышение эксперимента над расчетом в окне  $\lambda = 118,9 \text{ мкм}$  полностью было бы крайне затруднительно: как видно из рис. 1а, в участках  $\nu < 84 \text{ см}^{-1}$  и  $\nu > 84,8 \text{ см}^{-1}$ , т. е. вдали от линии  $\text{HDO}$ , учет ее практически не изменяет ситуацию.

В работе [9] на основе определенной из эксперимента температурной зависимости коэффициента поглощения на  $\nu_{\text{л}} = 84,323 \text{ см}^{-1}$  была сделана оценка возможного вклада в измеренное поглощение, вносимого димерами  $(\text{H}_2\text{O})_2$ . Оказалось, что он не превышает 2%. Поскольку избыточное поглощение, как видно из данных рис. 1, имеет нерезонансный характер, то и на других частотах димерное поглощение не является, по-видимому, его основным источником.

\* В работе [10] не указано, какому квантовому переходу отвечает эта линия. По-видимому, речь идет о линии вращательного перехода А-типа  $5_{05} - 6_{06}$ . Согласно последним данным [38] о вращательных термах  $\text{HDO}$  ее резонансная частота равна  $84,3686 \text{ см}^{-1}$ .

## ПОГЛОЩЕНИЕ В АТМОСФЕРНЫХ ПАРАХ ВОДЫ

Поглощение субмиллиметрового излучения атмосферным водяным паром измерялось одним из нас ранее [14]. Так как из рассматриваемых здесь шести окон прозрачности в [14] детально исследовались только два ( $\lambda = 118,9$  и  $142,3$  мкм), мы провели дополнительные исследования с тем, чтобы иметь более определенные сведения о поглощении и для других четырех окон. С целью контроля были также проведены повторные измерения в окнах  $\lambda = 118,9$  и  $142,3$  мкм, результаты этих измерений и измерений [14] практически совпали\*.

Таблица 2

Теоретические и экспериментальные значения коэффициента поглощения водяного пара в окнах относительной прозрачности для смеси  $\text{H}_2\text{O} + \text{воздух}$   
( $\rho = 7,5$  г/м<sup>3</sup>,  $T = 297$  К,  $P = 750$  Тор)

Окна прозрачности		$S, \text{ см}^{-1}$	$\Gamma_{\text{теор}}, \text{ дБ} \cdot \text{ км}^{-1}$	$\bar{\Gamma}_{\text{теор}}, \text{ дБ} \cdot \text{ км}^{-1}$	$\bar{\Gamma}_{\text{эксп}}, \text{ дБ} \cdot \text{ км}^{-1}$	$\frac{\bar{\Gamma}_{\text{эксп}}}{\bar{\Gamma}_{\text{теор}}}$	$\Gamma_{\text{эксп}}, \text{ дБ} \cdot \text{ км}^{-1}$
$\lambda, \text{ мкм}$	$\nu, \text{ см}^{-1}$						
97,1	103	0,85	2092	2280	$2440 \pm 100$	1,07	$2230 \pm 110$
102,8	97,3	0,75	2090	2300	$2500 \pm 100$	1,09	$2280 \pm 110$
115,6	94,7	0,75	1637	1755	$1980 \pm 80$	1,13	$1855 \pm 90$
110,3	90,7	0,65	2181	2370	$2630 \pm 100$	1,11	$2440 \pm 110$
118,9	84,1	0,55	770	806	$930 \pm 20$	1,15	$85 \pm 25$
142,3	70,3	0,5	721	758	$860 \pm 30$	1,13	$815 \pm 35$

Полученные из эксперимента минимальные значения коэффициента поглощения для окон прозрачности диапазона  $\lambda = 95 \div 145$  мкм вместе с соответствующими расчетными данными приведены в табл. 2. Значения  $\Gamma_{\text{теор}}$  вычислялись аналогично тому, как это делалось для чистых паров воды, с использованием полуширин линий  $\text{H}_2\text{O}$  для смеси водяной пар + воздух:

$$\Delta\nu_{ij}^{\text{H}_2\text{O}-\text{возд}} = \Delta\nu_{ij}^{\text{H}_2\text{O}-\text{сух.возд}} P (T/300)^{n_{ij}} + \Delta\nu_{ij}^{\text{H}_2\text{O}-\text{H}_2\text{O}} P_{\text{H}_2\text{O}} (T/300)^{m_{ij}}. \quad (2)$$

Парциальные полуширины  $\Delta\nu_{ij}^{\text{H}_2\text{O}-\text{сух.возд}}$ ,  $\Delta\nu_{ij}^{\text{H}_2\text{O}-\text{H}_2\text{O}}$  и их температурные показатели  $n_{ij}$  и  $m_{ij}$  брались из работ [22, 33] (с учетом поправки, сделанной в [22] относительно табличных данных [33]).

Как видно из табл. 2, превышение эксперимента над расчетом, хотя и не столь значительное, как для случая чистых паров  $\text{H}_2\text{O}$ , имеет место и для поглощения в атмосферном водяном паре. Можно заметить также, что в обоих случаях отношение  $\bar{\Gamma}_{\text{эксп}}/\bar{\Gamma}_{\text{теор}}$  коррелирует с величиной поглощения в окнах: для окон с меньшим поглощением оно, как правило, больше.

Сопоставим наши данные о поглощении в атмосферном водяном паре с результатами лазерных измерений [8, 10] на  $\nu_{\text{л}} = 84,323$  см<sup>-1</sup>. На этой частоте нами получено отношение  $\bar{\Gamma}_{\text{эксп}}/\bar{\Gamma}_{\text{теор}} = 1,14$ . Такое же значение дает отношение монохроматического коэффициента поглощения, измеренного в [8], к рассчитанной нами для условий измерений [8] величине  $\Gamma_{\text{теор}}(\nu_{\text{л}})$ . Иной результат следует из работы [10], в которой исследовалось поглощение в смеси  $\text{H}_2\text{O} + \text{N}_2$ . Пересчет измеренного авторами [10] поглощения к коэффициенту поглощения для смеси  $\text{H}_2\text{O} + \text{воздух}$  ( $\rho = 7,5$  г/м<sup>3</sup>,  $T = 297$  К,  $P = 750$  Тор) привел к величине

\* Ввиду того, что обработка экспериментальных данных в [14] проводилась без учета самоуширения линий  $\text{H}_2\text{O}$  и изменений температуры и давления воздуха в процессе измерений, результаты этой работы были пересмотрены в соответствии с методикой, изложенной в [32]. Однако результирующие поправки для всех окон, исследованных в [14], оказались несущественными (менее 4%).

не  $\Gamma_{\text{эксп}}(\nu_{\text{л}}) = 777 \text{ дБ/км}$ , которая оказалась даже несколько меньше полученного нами теоретического значения ( $\Gamma_{\text{теор}}(\nu_{\text{л}}) = 804 \text{ дБ/км}$ ). Заниженными, по нашему мнению, являются и результаты теоретического расчета авторов [10], который после соответствующего перехода от смеси  $\text{H}_2\text{O} + \text{N}_2$  к смеси  $\text{H}_2\text{O} + \text{воздух}$  дает значение  $\Gamma_{\text{теор}}(\nu_{\text{л}})$ , примерно на 15% меньшее вычисленного нами. Можно предполагать, что основной причиной расхождения расчетных данных является использование в [10] заниженных полуширин  $\Delta\nu_{ij}^{\text{H}_2\text{O}-\text{N}_2}$ . В пользу этого говорит тот факт, что для чистого водяного пара значения  $\Gamma_{\text{теор}}(\nu_{\text{л}})$ , полученные в [10] и нами, близки друг к другу (разница около 2%).

Рассматривая вопрос о величине превышения измеренных коэффициентов поглощения атмосферного водяного пара над теоретическими в более широком плане, отметим следующее. В ранних исследованиях (например в [14, 34]) указывалось, что в субмиллиметровых окнах прозрачности данные измерений и теоретического расчета для мономеров  $\text{H}_2\text{O}$  расходятся в 1,2—2 раза. В последующие годы, благодаря уточнению как экспериментальных, так и расчетных данных, ситуация заметно изменилась, что, однако, не всегда находит отражение в литературе. Анализ накопленных к настоящему времени сведений о поглощении в атмосферных парах воды показывает, что максимальное превышение измеренных значений коэффициента поглощения над расчетными для мономеров  $\text{H}_2\text{O}$  в окнах прозрачности диапазона  $\lambda \approx 50 \div 1000 \text{ мкм}$  составляет теперь примерно 50%. Учет поглощения димерами  $(\text{H}_2\text{O})_2$  позволяет для некоторых окон еще более сблизить теорию с экспериментом. Более подробное обсуждение данного вопроса выходит за рамки настоящей статьи.

Проведенное исследование показывает, что превышение эксперимента над расчетом в отношении поглощения в чистых парах  $\text{H}_2\text{O}$ , выявленное ранее для длинноволновых субмиллиметровых окон прозрачности [4–6], имеет место и для коротковолновых окон. Установлено также, что во всех исследованных окнах величина превышения для чистого водяного пара существенно больше, чем для смеси  $\text{H}_2\text{O} + \text{воздух}$ .

Сейчас вряд ли можно думать, что отмеченное несоответствие теории эксперименту связано с ширинами и интенсивностями спектральных линий  $\text{H}_2\text{O}$ : их рассчитанные значения в целом неплохо согласуются с измеренными (см., например, обзорные таблицы в [35]). Полученные данные свидетельствуют скорее в пользу того неоднократно высказывавшегося в литературе предположения, что расхождение результатов измерений и расчета для субмиллиметровых окон прозрачности обусловлено неточностью используемого в расчетах фактора формы спектральной линии в области ее далеких крыльев и учетом его зависимости от типа уширяющего газа.

Пользуемся случаем, чтобы выразить благодарность И. А. Раковой за расчеты на ЭВМ.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1 Жевакин С. А., Наумов А. П. — Изв вузов — Радиофизика, 1967, 10, № 9—10, с 1213
- 2 Соколов А. В. — Итоги науки и техники. Сер. Радиотехника, 1974, 5, с. 5.
- 3 Waters J. W. — Methods of experimental physics. Academic Press, 1976, 12, part B, p. 142
- 4 Frenkel L., Woods D. — Proc. IEEE, 1966, 54, № 4, p. 498.
- 5 Аганбекян К. А., Зражевский А. Ю., Колосов М. А., Соколов А. В. Тезисы X Всесоюзной конференции по распространению радиоволн. — М.: Наука, 1972, секция IV, с. 35.



- 6 Зражевский А. Ю. Диссертация М 1976
- 7 Burroughs W. J., Jones R. G., Gebbie H. A.—JQSRT, 1969, 9, № 6, p 809
- 8 Birch J. R., Burroughs W. J., Emery R. J.—Infrared Phys., 1969, 9, № 2, p. 75
- 9 Станкевич В С — Радиотехника и электроника, 1977, 22, № 6, с. 1273
- 10 Kempkens H., Mann R., Uhlenbusch J.—Infrared Phys, 1979, 19, № 5, p 585.
- 11 Simpson O. A., Bohlander R. A., Gallagher J J, Perkowski S.—J Phys Chemistry, 1980, 84, № 14, p. 1753.
- 12 Аверков С И, Аникин В И., Рядов В. Я, Фурашов Н. И. — ПТЭ, 1963, № 1, с. 108
- 13 Свердлов Б. А., Фурашов Н. И — Оптика и спектроскопия, 1974, 36, № 5, с 861.
- 14 Фурашов Н И — Оптика и спектроскопия, 1966, 20, № 3, с. 427.
- 15 Рудявская И. Г., Чернявская Н. А., Станевич А. Е., Фомина Т. Н., Окагов М А — ЖПС, 1971, 15, № 6, с 1122.
- 16 Turner H. E., Hay D. R.—Canad. J. Phys, 1970, 48, № 1, p. 2517.
- 17 Алянчикова Г. Н., Доронин М. А. — Труды НИИГМП, 1968, вып 19, с. 27.
- 18 Усольцев В. А. — Труды НИИГМП, 1969, вып. 22, с. 64.
- 19 Леонова Л. И., Ядова Л. А., Климин Н. Н., Фатеев Н. П., Резников Г. П., Куров Б. В., Доманькова Т. П. — Труды ГГО, 1978, вып 414, с 58; 82.
- 20 Schurer K.—J. Phys. E: Sci Instrum., 1981, 14, № 10, p 1153
- 21 Беспалов Д. П., Матвеев Л. Т., Козлов В. Н., Наумова Л. И. Психрометрические таблицы. — Л.: Гидрометеиздат, 1981.
- 22 Benedict W. S., Kaplan L. D. — JQSRT, 1964, 4, № 3, p 453.
- 23 Schwendeman R. H., Laurie V. W. Tables of line strengths—Pergamon Press, 1958
- 24 Wacker P. F., Pratto M. R. Microwave spectral tables. Volume II: Line strengths of asymmetric rotors. NBS Monograph 70, 1964.
- 25 Pugh L. A., Rao K. N.—J. Molec. Spectr., 1973, 47, № 3, p. 403.
- 26 Flaud J.-M., Camy-Peyret C., Maillard J. P.—Molec. Phys, 1976, 32, № 2, p. 499.
- 27 Clough S A, Beers Y., Klein G. P., Rothman L. S.—J. Chem Phys., 1973, 59, № 5, p. 2254.
- 28 Duke T. R., Muentner J. S.—J. Chem. Phys, 1973, 59, № 6, p. 3125.
- 29 Соскин М. С — Укр. физ журн., 1959, 4, № 2, с 239.
- 30 Рядов В. Я., Фурашов Н. И., Шаронов Г. А. — Радиотехника и электроника, 1964, 9, № 6, с 943
- 31 Benedict W. S., Claassen H. H., Shaw J. H. — J. Res. NBS, 1952, 49, № 2, p. 91.
- 32 Рядов В. Я., Фурашов Н. И — Изв вузов — Радиофизика, 1972, 15, № 10, с 1475
- 33 Benedict W. S., Kaplan L. D.—J Chem. Phys, 1959, 30, № 2, p. 388
- 34 Рядов В. Я., Шаронов Г. А. — Радиотехника и электроника, 1966, 11, № 6, с 1037.
- 35 Рядов В. Я., Фурашов Н. И — Изв. вузов — Радиофизика, 1975, 18, № 3, с 358
- 36 Papineau N, Camy-Peyret C., Flaud J.-M., Guelachvili G.—J. Molec. Spectr, 1982, 92, № 2, p. 451.

Научно-исследовательский радиофизический институт

Поступила в редакцию  
17 августа 1983 г.

## RADIATION ABSORPTION BY WATER VAPOR IN WINDOWS OF RELATIVE TRANSPARENCY OF 95 ÷ 145 $\mu\text{m}$ RANGE

*B. A Sverdlov, N. I Furashov*

Results are presented of spectrometric measurements and theoretical calculations of the absorption coefficient of pure and atmospheric water vapor for six submillimeter windows of relative transparency. In all windows the measured absorption exceeds the calculated one: for pure water vapor the divergence is essentially larger than for the atmospheric water vapor.