

## Столкновительное уширение линий CO<sub>2</sub> давлением N<sub>2</sub>O

А.С. Дударёнок<sup>1</sup>, Н.Н. Лаврентьева<sup>1</sup>, К.И. Аршинов<sup>2</sup>, В.В. Невдах<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1, Россия

<sup>2</sup>Институт технической акустики НАН Беларуси  
210023, г. Витебск, пр. Людникова, 13, Беларусь

<sup>3</sup>Белорусский национальный технический университет  
220027, г. Минск, ул. Я. Коласа, 22, Беларусь

Поступила в редакцию 12.05.2011 г.

Коэффициенты уширения линий CO<sub>2</sub> давлением N<sub>2</sub>O, а также их температурные показатели рассчитаны для широкого диапазона вращательных квантовых чисел в полосе 00<sup>0</sup>1–10<sup>0</sup>0. Использовался полуэмпирический метод, основанный на ударной полуклассической теории уширения, который хорошо зарекомендовал себя при расчетах полуширин и сдвигов линий давлением для систем H<sub>2</sub>O–N<sub>2</sub>(O<sub>2</sub>), CO<sub>2</sub>–N<sub>2</sub>(O<sub>2</sub>) и O<sub>3</sub>–N<sub>2</sub>(O<sub>2</sub>). Вычисленные столкновительные полуширины сравнивались с измеренными данными, полученными с помощью стабилизированного по частоте перестраиваемого CO<sub>2</sub>-лазера, для 11 колебательно-вращательных переходов с вращательными квантовыми числами нижнего состояния до 38 при комнатной температуре и для трех переходов R(10), R(22), R(32) в интервале температур 300 ≤ T ≤ 700 К в полосе 00<sup>0</sup>1–10<sup>0</sup>0. Рассчитанные и измеренные данные находятся в хорошем согласии.

**Ключевые слова:** контур спектральной линии, коэффициенты уширения, стабилизированный по частоте перестраиваемый CO<sub>2</sub>-лазер, закись азота; contour of spectral line, broadening coefficients, frequency-stabilized tunable CO<sub>2</sub>-laser, nitrous oxide.

### Введение

Исследование спектров высокого разрешения углекислого газа необходимо для решения задач физики атмосферы, астрофизики, а также лазерной физики. При исследовании высокоточных спектров нагретых смесей газов, состоящих из продуктов сгорания углеводородных топлив (углекислого газа, закиси азота, окиси углерода и др.), необходимы параметры спектральных линий углекислого газа в широком интервале температур, в том числе и коэффициенты уширения линий CO<sub>2</sub> давлением различных буферных газов. В литературе широко представлено уширение линий углекислого газа давлением основных атмосферных газов N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> [1–8], инертных газов Ar, He [3, 4, 9, 10] и собственным давлением [11–13], в то время как эти параметры контура линий для смесей CO<sub>2</sub>–N<sub>2</sub>O практически не исследовались. В работе [4] изучались столкновительные полуширины линий углекислого газа в зависимости от вида буферной частицы. Наряду со многими уширяющими газами в [4] измерен коэффициент уширения линии углекислого газа давлением закиси азота для одного колебательно-вращательного перехода P(20) в полосе 00<sup>0</sup>1–10<sup>0</sup>0.

Известно, что колебательная зависимость столкновительных полуширин линий слаба: изменение уширения от полосы к полосе составляет несколько процентов. В связи с этим полученные коэффициенты уширения в одной колебательной полосе могут быть использованы в качестве полуширин для других полос поглощения. В настоящее время зачастую используется один коэффициент температурной зависимости для всей полосы. Однако температурный показатель в пределах полосы может существенно варьироваться, поскольку заселенность нижнего уровня для различных вращательных квантовых чисел изменяется от температуры по-разному. В связи с этим необходимо получить эти параметры для каждой линии отдельно.

В статье приводятся экспериментальные и рассчитанные полуширины линий углекислого газа давлением закиси азота в широком интервале вращательных квантовых чисел в полосе 00<sup>0</sup>1–10<sup>0</sup>0, а также температурные показатели коэффициентов уширения.

### Описание эксперимента

Экспериментальная установка для измерений коэффициентов поглощения в газах организована по двухлучевой компенсационной схеме на линиях генерации стабилизированного по частоте CO<sub>2</sub>-лазера, перестраиваемого по линиям основных лазерных переходов 00<sup>0</sup>1–[10<sup>0</sup>0, 02<sup>0</sup>0]<sub>1,п</sub>. Долговременная нестабильность частоты генерации лазера не превышала

\* Анна Сергеевна Дударёнок (osip0802@sibmail.com);  
Нина Николаевна Лаврентьева (lpp@iao.ru); Константин  
Иванович Аршинов (ITAАKI@yandex.by); Владимир Влади-  
мирович Невдах (v.v.nev@bk.ru).

$\pm 0,5$  МГц относительно центральной частоты линии генерации, позволяя при реализуемых экспериментально ширинах линий поглощения ( $> 50$  МГц) с достаточной точностью считать, что измерения коэффициентов поглощения проводились на центральных частотах линий поглощения.

Известно, что при увеличении давления углекислого газа происходит не только уширение его колебательно-вращательных линий поглощения, но и их сдвиг. При необходимости это обстоятельство учитывается в соответствующем выражении для фактора линий. Однако при рассматриваемых в настоящей статье давлениях и температурах этот сдвиг очень мал по сравнению с ширинами линий и он обычно не учитывается, так как не приводит к заметным погрешностям при определении коэффициентов поглощения [14]. Измерительная двухпроходная кювета изготовлена из кварцевой трубы с внутренним диаметром 35 мм и длиной 1 м, к торцам которой с помощью высокотемпературного клея приклеены окна из ВаF<sub>2</sub>. Кювета нагревается внешней нихромовой спиралью и помещена в контейнер с тепловой изоляцией. Диаметр зондирующего луча равен  $\sim 1,5$  мм. Для приготовления газовых смесей использовали диоксид углерода чистоты 99,99% и закись азота 98,13%. Температура газа в измерительной кювете поддерживалась с точностью  $\Delta T = \pm 0,4^\circ$  (диапазон  $293 \leq T \leq 420$  К) и  $\Delta T = \pm 0,9^\circ$  ( $470 \leq T \leq 700$  К). Погрешность измерения коэффициентов поглощения не превышала  $\Delta\alpha = \pm 3 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1}$  (диапазон  $293 \leq T \leq 420$  К) и  $\Delta\alpha = \pm 5 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1}$  ( $470 \leq T \leq 700$  К).

Измерены относительные коэффициенты уширения линий в смеси CO<sub>2</sub>–N<sub>2</sub>O, равные отношению коэффициентов уширения линий CO<sub>2</sub> давлением N<sub>2</sub>O к коэффициентам самоуширения линий, для 8 переходов в полосе 00<sup>0</sup>1–10<sup>0</sup> при комнатной температуре. Рассмотренные линии принадлежат R-ветви с вращательными квантовыми числами  $J$  от 8 до 38. Зарегистрированы относительные полуширины линий для трех переходов [R(10), R(22) и R(32)] в полосе 00<sup>0</sup>1–10<sup>0</sup> при  $300 \leq T \leq 700$  К. Экспериментальные значения  $\gamma_{\text{CO}_2\text{-N}_2\text{O}}^{\text{эксп}}$  извлекались из относительных коэффициентов уширения  $b_{\text{N}_2\text{O}}$  с использованием рассчитанных коэффициентов самоуширения  $\gamma_{\text{CO}_2\text{-CO}_2}^{\text{расч}}$ .

## Метод и детали расчета

Расчеты проводились в рамках полуэмпирического подхода [15], который ранее успешно применялся при вычислениях ударных параметров контура линий молекул водяного пара, углекислого газа и озона [15–19]. Полуэмпирический подход является параметрической модификацией ударной полуклассической теории уширения [18]. Подробное описание метода можно найти в работе [15], здесь мы представляем только основные соотношения. При выводе формул в полуклассической теории вводятся следующие приближения. Вклад в уширение линий дают только бинарные столкновения. Относительное движение сталкивающихся молекул описывается с использованием формул классической физики.

Считаем, что спектральные линии являются изолированными.

Полуширина колебательно-вращательной линии в полуклассической ударной теории может быть представлена выражением

$$\gamma_{fi} = A(f, i) + \sum_l \sum_{i'} D^2(ii'|l) P_l(\omega_{ii'}) + \sum_l \sum_{f'} D^2(ff'|l) P_l(\omega_{ff'}),$$

где

$$A(f, i) = \frac{n}{c} \sum_r \rho(r) \int_0^\infty v f(v) b_0^2(v, r, i, f) dv$$

– слагаемое, в котором в явном виде указана зависимость от параметра прерывания  $b_0$ ;  $n$  – концентрация молекул буферного газа;  $\rho(r)$  – заселенность уровня  $r$ ;  $r$  – набор квантовых чисел возмущающей молекулы;  $v$  – относительная скорость сталкивающихся молекул;  $D^2(ii'|l)$ ,  $D^2(ff'|l)$  – силы переходов, относящиеся к каналам рассеяния  $i \rightarrow i'$ ,  $f \rightarrow f'$  для дипольного ( $l = 1$ ), квадрупольного ( $l = 2$ ) типов переходов;  $P_l(\omega_{ii'})$  – функции эффективности;  $\omega_{ii'}$ ,  $\omega_{ff'}$  – каналы рассеяния, соответствующие переходам с нижнего и верхнего уровней.

Силы переходов определяются только свойствами поглощающей молекулы: мультипольными моментами, волновыми функциями. Функции эффективности зависят в большей степени от взаимодействия сталкивающихся молекул, а именно от межмолекулярного потенциала и от траекторий относительного движения молекул. Выражение для функции эффективности имеет вид

$$P_l(\omega_{ii'}) = \frac{n}{c} \sum_r \rho(r) \sum_{l', r'} A_{ll'} D^2(rr'|l') F_{ll'} \times \left( \frac{2\pi c b_0(r, i, f)}{v} (\omega_{ii'} + \omega_{rr'}) \right).$$

В полуэмпирическом методе вводится корректирующий множитель к функции  $P_l$ :

$$P_l(\omega) = C_l(\omega) P_l^A(\omega). \quad (1)$$

Здесь в качестве начального приближения используется функция эффективности  $P_l^A(\omega)$ , получаемая из теории Андерсона–Тсао–Карната. Использование  $P_l(\omega)$  вида (1) позволяет учесть поправки, связанные с отсутствием высоких членов разложения межмолекулярного потенциала, близкоедействующей части потенциала взаимодействия, мультипольных моментов высокого порядка, искривления траекторий и т.д. В настоящей статье корректирующий фактор использовался в следующем виде:

$$C_l = \frac{c_1}{c_2 \sqrt{J} + 1},$$

где  $c_1$ ,  $c_2$  – подгоночные параметры. Вид корректирующего фактора получен из анализа вращательной

Измеренные и рассчитанные полуширины линий  $\text{CO}_2$  давлением  $\text{N}_2\text{O}$ , коэффициенты температурной зависимости ( $N$ )

$J''$	$J'$	$\gamma^{\text{теор}}, \text{см}^{-1}/\text{атм}$	$\gamma^{\text{эксп}}, \text{см}^{-1}/\text{атм}$	$N^{\text{теор}}$	$N^{\text{эксп}}$
1	0	0,0967		0,739	
3	2	0,0886		0,748	
5	4	0,0920		0,734	
7	6	0,0925		0,721	
9	8	0,0922	0,0902(59)*	0,711	
11	10	0,0915	0,0863(121)	0,704	0,69
13	12	0,0908		0,699	
15	14	0,0902		0,696	
17	16	0,0894	0,0887(70)	0,693	
19	18	0,0887		0,689	
21	20	0,0879		0,683	
23	22	0,0870	0,0897(38)	0,675	0,66
25	24	0,0861		0,667	
27	26	0,0850	0,0948(50)	0,657	
29	28	0,0839	0,0891(49)	0,645	
31	30	0,0827	0,0873(53)	0,633	
33	32	0,0815	0,0802(56)	0,621	0,58
35	34	0,0803	0,0831(61)	0,609	
37	36	0,0790	0,0750(65)	0,598	
39	38	0,0778	0,0737(87)	0,589	
41	40	0,0766		0,581	
43	42	0,0754		0,575	
45	44	0,0744		0,571	
47	46	0,0734		0,569	
49	48	0,0725		0,569	
51	50	0,0716		0,571	
53	52	0,0709		0,575	
55	54	0,0703		0,58	
57	56	0,0697		0,587	
59	58	0,0692		0,595	
61	60	0,0688		0,604	
63	62	0,0685		0,613	
65	64	0,0682		0,623	
67	66	0,0679		0,632	
69	68	0,0678		0,642	
71	70	0,0676		0,651	
73	72	0,0675		0,659	
75	74	0,0674		0,667	
77	76	0,0673		0,675	
79	78	0,0672		0,682	
81	80	0,0672		0,687	

\* Ошибка измерения ( $1\sigma$ ) в единицах последней значащей цифры.

зависимости полуширин линий для сталкивающихся пар молекул  $\text{H}_2\text{O}-\text{N}_2(\text{O}_2)$ ,  $\text{CO}_2-\text{N}_2(\text{O}_2)$  [15]. Подгоночные параметры  $c_1$ ,  $c_2$  находятся из сравнения результатов расчета с измеренными полуширинами линий.

Вычисления проводились при учете квадруполь-дипольного и квадруполь-квадрупольного взаимодействий. Значения мультипольных моментов и вращательных постоянных молекул, необходимые в расчетах коэффициентов уширения линий, взяты из работы [20] (табл. 1).

Таблица 1

Параметры молекул, использованные в расчетах

Молекула	Дипольный момент, $D$	Квадрупольный момент, $D \cdot \text{Å}$	Вращательная постоянная, $\text{см}^{-1}$
$\text{CO}_2$	$\mu = 0$	$\theta = -4,3$	$B = 0,390$
$\text{N}_2\text{O}$	$\mu = 0,1608$	$\theta = -3,0$	$B = 0,419$

Для получения параметров полуэмпирической модели в случае самоуширения использованы экспериментальные данные [1]. Представленные в базе спектроскопических данных HITRAN [21] и в работе [22] коэффициенты  $\gamma_{\text{CO}_2-\text{CO}_2}$  находятся в хорошем согласии с рассчитанными нами данными (рис. 1).

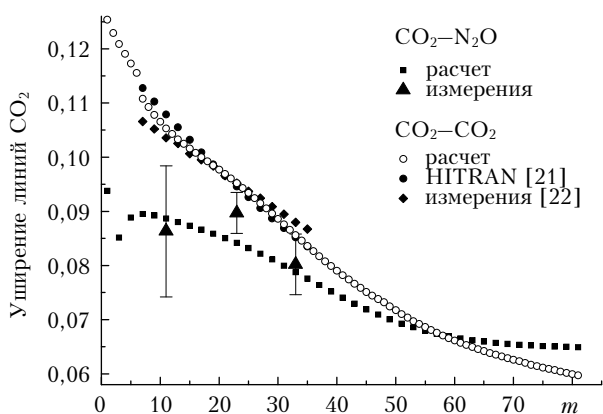


Рис. 1. Зависимость коэффициентов уширения линий от вращательного квантового числа  $m$  для систем  $\text{CO}_2-\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2-\text{CO}_2$  ( $m = J + 1$ )

Для системы  $\text{CO}_2-\text{N}_2\text{O}$  коэффициенты  $c_1 = 0,6$  и  $c_2 = 0,02$  получены подгонкой к трем экспериментальным полуширинам линий  $R(10)$ ,  $R(22)$  и  $R(32)$  при комнатной температуре, как показано на рис. 1. Расчеты полуширин линий  $\text{CO}_2$  давлением  $\text{N}_2\text{O}$  и в случае самоуширения проведены для переходов  $R$ -ветви с вращательными квантовыми числами нижнего состояния до  $J = 80$  для 10 температур в интервале от 300 до 700 К.

## Обсуждение результатов

### Полуширины линий при комнатной температуре

Экспериментальные и рассчитанные полуширины линий  $\text{CO}_2$  давлением  $\text{N}_2\text{O}$  представлены в табл. 2.

Теоретические значения  $\gamma_{\text{CO}_2-\text{N}_2\text{O}}$  плавно уменьшаются от 0,0967 (при  $J = 0$ ) до 0,0672  $\text{см}^{-1}/\text{атм}$  (при  $J = 80$ ), так же ведут себя экспериментальные полуширины. Как видно из рис. 1, вращательная зависимость полуширин линий для случая  $\text{CO}_2-\text{CO}_2$  более сильная, чем для случая  $\text{CO}_2-\text{N}_2\text{O}$ , и для  $J < 56$  значения  $\gamma_{\text{CO}_2-\text{CO}_2} > \gamma_{\text{CO}_2-\text{N}_2\text{O}}$ . Это объясняется различием в мультипольных моментах и структуре колебательно-вращательного энергетического спектра уширяющих молекул.

Сравнение результатов расчетов и измерений для системы  $\text{CO}_2-\text{N}_2\text{O}$  представлено на рис. 1, 2.

Вычисленные значения полуширин попадают в пределы ошибки эксперимента для всех колебательно-вращательных переходов кроме одного —  $R(26)$ : измеренная и рассчитанная полуширины линии равны

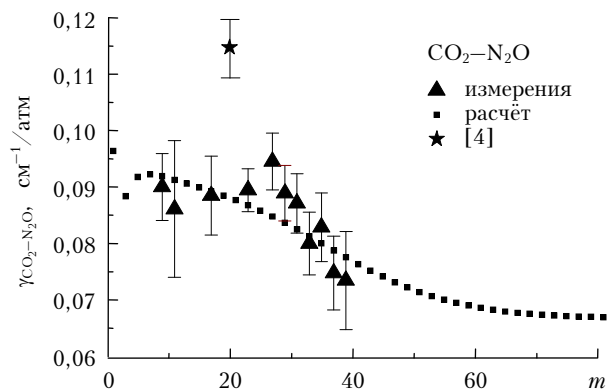


Рис. 2. Зависимость коэффициентов уширения  $\gamma_{CO_2-N_2O}$  от вращательного квантового числа  $m$

0,0948(50) и 0,08503  $cm^{-1}/atm$  соответственно. Однако в целом для всех полученных данных видно хорошее согласие, соответствующее среднеквадратическое отклонение (СКО) равно 0,0045  $cm^{-1}/atm$ .

Измеренная в работе [4] полуширина линии  $P(20)$  для данной системы молекул равна 0,115  $cm^{-1}/atm$  и, как видно из рис. 2, существенно больше полученных в данной работе значений ( $\gamma_{CO_2-N_2O}^{эксп}$  и  $\gamma_{CO_2-N_2O}^{расч}$ ). Представленные в [4] величины полуширин линий для некоторых буферных газов также больше других экспериментальных данных, как, например, в случае уширения азотом (рис. 3, отмечен звездочкой).

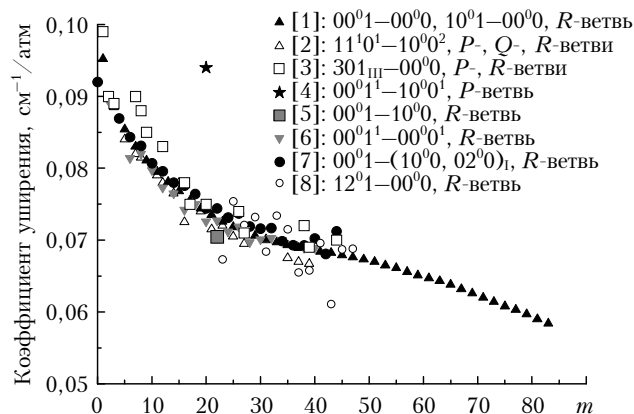


Рис. 3. Зависимость измеренных коэффициентов уширения линий  $CO_2$  давлением  $N_2$  в зависимости от вращательного квантового числа  $m$  ( $m = J + 1$  для  $R$ -ветви,  $m = J$  для  $P$ -,  $Q$ -ветвей) [1–8]

На рис. 3 представлены столкновительные полуширины линий для случая  $CO_2-N_2$  в различных колебательных полосах, в том числе и полученная ранее авторами настоящей статьи с использованием описанной выше методики в полосе  $00^0 1-10^0 0$  (отмечена серым квадратом) [5].

Видно, что коэффициент уширения действительно слабо меняется при изменении колебательного квантового числа. Исключение составляют полуширины в полосе  $12^0 1-00^0 0$ . Например, для линии  $R(42)$  коэффициент уширения в полосе  $12^0 1-00^0 0$  меньше соответствующего значения в полосе  $10^0 1-00^0 0$  на 10,4%.

### Температурная зависимость полуширин линий

Температурная зависимость полуширин линий обычно определяется эмпирической формулой следующего вида:

$$\gamma = \gamma_0 (T_0/T_k)^N,$$

где  $\gamma_0$  – полуширина линии при некоторой опорной температуре  $T_0$ ;  $N$  – коэффициент температурной зависимости (температурный показатель). Мы берем в качестве опорной температуры  $T_0 = 300$  К. Значение параметра  $N$  получено в результате усреднения температурных показателей, найденных из 10 пар полуширин  $\gamma_0$  и  $\gamma(T_k)$ ,  $T_k \neq 300$  К,  $k = 1 \dots 10$ .

Изменение экспериментальных и рассчитанных коэффициентов уширения линий  $CO_2$  давлением  $N_2O$  с увеличением температуры представлено на рис. 4 (темные значки обозначают измеренные данные, светлые – вычисленные).

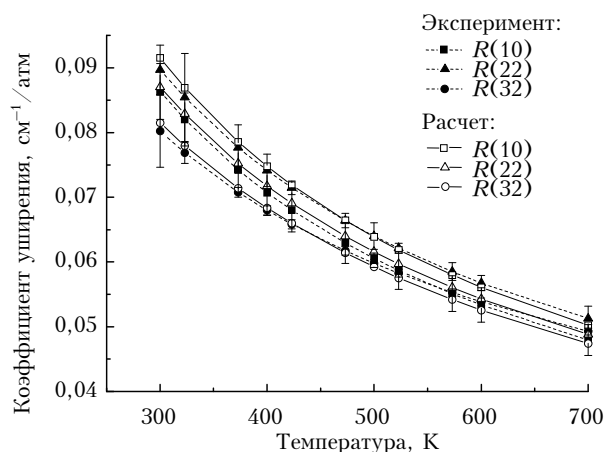


Рис. 4. Коэффициенты уширения  $\gamma_{CO_2-N_2O}$  при различных температурах

При возрастании температуры от 300 до 700 К значения  $\gamma^{эксп}$  для трех колебательно-вращательных переходов  $R(10)$ ,  $R(22)$ ,  $R(32)$  и  $\gamma^{расч}$  для всех рассмотренных переходов с  $J$  от 0 до 80 монотонно уменьшаются в среднем на 42%. Например, значение  $\gamma^{расч}$  для  $R(22)$  при минимальной из рассматриваемых температур равно 0,0870  $cm^{-1}/atm$ , при максимальной температуре – 0,0488  $cm^{-1}/atm$ .

Полученные коэффициенты температурной зависимости представлены в табл. 2.

Величины  $N^{эксп}$  для колебательно-вращательных переходов  $R(10)$ ,  $R(22)$ ,  $R(32)$  равны 0,69; 0,66; 0,58 соответственно. Вычисленные температурные показатели изменяются в интервале от 0,569 до 0,748, при этом максимальное различие между значениями  $N^{расч}$  и  $N^{расч}(T_k)$  равно 0,034. Точность восстановления коэффициентов уширения при температуре  $T_k$  из параметров  $\gamma_0$  и  $N$  изменяется от 0,02% при 323 К до 0,3% при 700 К для экспериментальных значений и от 0,1% при 323 К до 1,2% при 700 К для вычисленных значений.

Температурные показатели не являются монотонной функцией вращательного квантового числа (рис. 5):  $N^{\text{расч}}$  достигает минимального значения при  $J = 46$ .

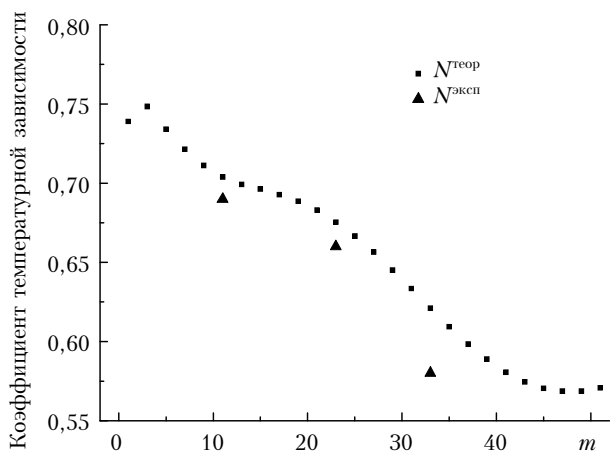


Рис. 5. Температурные показатели для полуширин  $\gamma_{\text{CO}_2-\text{N}_2\text{O}}$  в зависимости от вращательного квантового числа  $m$

Видно, что измеренные температурные показатели меньше теоретических значений для каждого из трех колебательно-вращательных переходов, однако  $N^{\text{расч}}$  и  $N^{\text{эксп}}$  имеют одинаковые зависимости от  $J$ . Для коэффициентов  $N$  СКО равна 0,026.

### Заклучение

Получены столкновительные полуширины линий углекислого газа давлением закиси азота вблизи 10,6 мкм. Рассмотрена вращательная зависимость коэффициентов уширения линий для смеси  $\text{CO}_2-\text{N}_2\text{O}$ . Определены коэффициенты температурной зависимости полуширин линий в широком интервале вращательных квантовых чисел. Температурные показатели изменяются в пределах от 0,569 до 0,748.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 10-08-90014-Бел\_а) и БРФФИ (грант Ф10Р-013).

1. Margottin-Maclou M., Dahoo P., Henry A., Valentin A., Henry L. Self-,  $\text{N}_2$ -, and  $\text{O}_2$ -broadening parameters in the  $\nu_3$  and  $\nu_1 + \nu_3$  bands of  $^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$  // J. Mol. Spectrosc. 1988. V. 131, iss. 1. P. 21–35.
2. Dana V., Valentin A., Hamdouni A., Rothman L. Line intensities and broadening parameters of the 11101–10002 band of  $^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$  // Appl. Opt. 1989. V. 28, N 13. P. 2562–2566.
3. Nakamichi Sh., Kawaguchi Y., Fukuda H., Enami Sh., Hashimoto S., Kawasaki M., Umekawa T., Morino I., Sutoc H., Inoue G. Buffer-gas pressure broadening for the  $(30^0_1)_{\text{III}} \leftarrow (000)$  band of  $\text{CO}_2$  measured with continuous-wave cavity ring-down spectroscopy // Phys. Chem. Chem. Phys. 2006. V. 8, iss. 2. P. 364–368.
4. Meyer Th., Rhodes Ch., Haus H. High-resolution line broadening and collisional studies in  $\text{CO}_2$  using nonlinear spectroscopic techniques // Phys. Rev. A. 1975. V. 12, N 5. P. 1993–2008.

5. Аршинов К.И., Аршинов М.К., Невдах В.В. О температурной зависимости столкновительных полуширин линий лазерного перехода  $10^0-00^0_1$  молекулы  $\text{CO}_2$  // Квант. электрон. 2010. Т. 40, № 7. С. 629–632.
6. Devi V., Benner D., Rinslandt C., Smith M. Measurements of pressure broadening and pressure shifting by nitrogen in the 4.3- $\mu\text{m}$  band of  $^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$  // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer. 1992. V. 48, iss. 5–6. P. 581–589.
7. Devi V., Benner D., Smith M., Rinslandt C. Air- and  $\text{N}_2$ -broadening coefficients and pressure shift coefficients in the  $^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$  laser bands // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer. 1998. V. 59, iss. 3–5. P. 137–149.
8. Corsi C., D'Amato F., Rosa M., Modugno G. High-resolution measurements of line intensity, broadening and shift of  $\text{CO}_2$  around 2  $\mu\text{m}$  // Eur. Phys. J. D. 1999. V. 6, iss. 3. P. 327–332.
9. Thibault F., Boissoles J., Doucen R., Bouanich J.P., Arcas Ph., Boulet C. Pressure induced shifts of  $\text{CO}_2$  lines: Measurements of in the  $00^0_3-00^0_0$  band and theoretical analysis // J. Chem. Phys. 1992. V. 96, N 7. P. 4945–4953.
10. Wooldridge M.S., Hanson R.K., Bowman C.T. Argon broadening of the  $R(48)$ ,  $R(50)$ , and  $R(52)$  lines of  $\text{CO}_2$  in the  $(00^0_1)-(00^0_0)$  band // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer. 1997. V. 57, N 3. P. 425–434.
11. Predoi-Cross A., May A.D., Vitcu A., Drummond J.R., Hartmann J.-M., Boulet C. Brodening and line mixing in the  $20^0_0 \leftarrow 01^1_0$ ,  $11^1_0 \leftarrow 00^0_0$ , and  $12^2_0 \leftarrow 01^1_0$  Q branches of carbon dioxide: experimental results and energy corrected sudden modeling // J. Chem. Phys. 2004. V. 120, N 22. P. 10520–10529.
12. Predoi-Cross A., Luo C., Berman R., Drummond J.R., May A.D. Line strengths, self-broadening, and line-mixing in the  $20^0_0 \leftarrow 01^1_0$  ( $\Sigma \leftarrow \Pi$ ) Q-branch of carbon dioxide // J. Chem. Phys. 2000. V. 112, N 19. P. 8367–8377.
13. Rosa M., Corsi C., Modugno G., D'Amato F. Collisional broadening and shift of lines in the  $2\nu_1 + 2\nu_2 + \nu_3$  band of  $\text{CO}_2$  // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer. 1999. V. 61, N 1. P. 97–104.
14. Буланин М.О., Булычев В.П., Ходос Э.Б. Определение параметров колебательно-вращательных линий в полосах 9,4 и 10,4 мкм  $\text{CO}_2$  при различных температурах // Оптика и спектроскопия. 1980. Т. 48, № 4. С. 732–737.
15. Vykov A., Lavrentieva N., Sinitsa L. Semi-empiric approach to the calculation of  $\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{CO}_2$  line broadening and shifting // Mol. Phys. 2004. V. 102, iss. 14–15. P. 1653–1658.
16. Lavrentieva N., Osipova A., Sinitsa L., Claveau Ch., Valentin A. Shifting temperature dependence of nitrogen-broadened lines in the  $\nu_2$  band of  $\text{H}_2\text{O}$  // Mol. Phys. 2008. V. 106, N 5. P. 1261–1266.
17. Булдырева Ж., Лаврентьева Н.Н., Осипова А.С., Мишина Т.П. Теоретический расчет коэффициентов столкновительного уширения спектральных линий озона давлением атмосферных газов // Оптика и спектроскопия. 2010. Т. 108, № 4. С. 549–559.
18. Tsao C.J., Curnutte B. Line-widths of pressure-broadened spectral lines // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer. 1961. V. 2, iss. 1. P. 41–91.
19. Лаврентьева Н.Н., Мишина Т.П., Синица Л.Н., Тенисон Дж. Расчеты самоуширения и самосдвига спектральных линий водяного пара с использованием точных колебательно-вращательных волновых функций // Оптика атмосфер. и океана. 2008. Т. 21, № 12. P. 1096–1100.

20. *Стариков В.И., Лаврентьева Н.Н.* Столкновительное уширение спектральных линий поглощения молекул атмосферных газов. Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2006. 308 с.
21. *Rothman L.S., Gordon I.E., Barbe A., Benner C.D., Bernath P.F., Birk M., Boudon V., Brown L.R., Campargue A., Champion J.-P., Chance K., Coudert L.H., Dana V., Devi V.M., Fally S., Flaud J.-M., Gamache R.R., Goldman A., Jacquemart D., Kleiner I., Lacome N., Lafferty W.J., Mandin J.-Y., Massie S.T., Mikhailenko S.N., Miller C.E., Moazzen-Ahmadi N., Naumenko O.V., Nikitin A.V., Orphal J., Perevalov V.I., Perrin A., Predoi-Cross A., Rinsland C.P., Rotger M., Simeckovar M., Smith M.A.H., Sung K., Tashkun S.A., Tennyson J., Toth R.A., Vandaele A.C., Vander Auwera J.* The HITRAN-2008 molecular spectroscopic database // *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer.* 2009. V. 110, N 9–10. P. 533–572.
22. *Невдах В.В.* Вероятности спонтанного излучения и столкновительные ширины линий лазерных переходов  $00^0_1-[10^0_0, 02^0_0]_{I,II}$  // *Квант. электрон.* 1984. Т. 11, № 8. С. 1622–1627.

*A.S. Dudaryonok, N.N. Lavrentieva, K.I. Arshivov, V.V. Nevdakh.* **Broadening coefficients of CO<sub>2</sub> lines induced by N<sub>2</sub>O pressure.**

N<sub>2</sub>O-broadening coefficients of CO<sub>2</sub> lines and their temperature exponents were calculated for a wide range of rotational quantum number in the  $00^0_1-10^0_0$  band. We used the semi-empirical method based on the semi-classical impact theory. It has been already applied for calculation of pressure broadening and shifting coefficients of spectral lines and their temperature exponents for H<sub>2</sub>O–N<sub>2</sub>(O<sub>2</sub>), CO<sub>2</sub>–N<sub>2</sub>(O<sub>2</sub>), and O<sub>3</sub>–N<sub>2</sub>(O<sub>2</sub>) systems. The computed collisional half-widths were compared with the measured data obtained using a frequency-stabilized tunable CO<sub>2</sub>-laser for 11 rovibrational transitions with lower state rotational quantum number up to 38 at room temperature and for 3 transitions  $R(10)$ ,  $R(22)$ ,  $R(32)$  in temperature range  $300 \leq T \leq 700$  K in the  $00^0_1-10^0_0$  band. The calculated and measured data are in a good agreement.