

# Самоуширение линий поглощения и изотропного рамановского рассеяния ацетилена: расчеты в рамках классической ударной теории в широком диапазоне температур

© С.В. Иванов

НИЦ „Курчатовский институт“, ФНИЦ „Кристаллография и фотоника“,  
Москва, Россия

е-mail: serg.ivanov.home@mail.ru

Поступила в редакцию 02.06.2025 г.

В окончательной редакции 11.10.2025 г.

Принята к публикации 13.10.2025 г.

Разработан метод самосогласованного классического траекторного моделирования столкновений  $\text{C}_2\text{H}_2-\text{C}_2\text{H}_2$ . Выведенные в явном виде уравнения движения использованы для расчета колебательно-вращательных столкновительных ширин линий поглощения и изотропного рамановского (комбинационного) рассеяния ацетилена в рамках классической ударной теории. Динамические расчеты выполнены с использованием простейшего атом-атомного+квадруполь-квадрупольного межмолекулярного потенциала взаимодействия  $\text{C}_2\text{H}_2-\text{C}_2\text{H}_2$ . Рассчитаны зависимости коэффициентов самоуширения линий  $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$  от вращательного квантового числа  $J$  ( $J \leq 40$ ) в диапазоне температур от 150 до 700 К, а также показатели температурной зависимости уширения. Проведено сравнение с имеющимися экспериментальными данными. Проанализирован вклад столкновений различных типов (упругих, неупругих, столкновительных комплексов) в самоуширение линий, а также роль электрического квадрупольного момента  $\text{C}_2\text{H}_2$ .

**Ключевые слова:** ацетилен, колебательно-вращательные линии, столкновительное уширение, классическая ударная теория, метод классических траекторий, межмолекулярные взаимодействия, столкновительные комплексы.

DOI: 10.61011/OS.2025.10.61951.8238-25

## 1. Введение

Ацетилен представляет собой линейную симметричную молекулу (химическая формула  $\text{C}_2\text{H}_2$ , структурная формула  $\text{H}-\text{C}=\text{C}-\text{H}$ , точечная группа  $D_{\infty h}$ ). Имеет пять нормальных колебаний:  $\nu_1 = 3373.7 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\nu_2 = 1973.8 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\nu_3 = 3287 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\nu_4 = 611.8 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\nu_5 = 729.1 \text{ cm}^{-1}$  [1]. Спектр  $\text{C}_2\text{H}_2$  в районе  $14 \mu\text{m}$  (полоса  $\nu_5$ ) наблюдался в атмосферах Юпитера, Сатурна и Титана [2,3]. Ацетилен имеет разнообразные практические применения. Главное его свойство — способность обеспечивать и поддерживать температуру пламени до  $3150^\circ\text{C}$ . Традиционно  $\text{C}_2\text{H}_2$  в баллонах применяют для проведения сварочных работ и раскroя металлических изделий (в паре с кислородом). Также  $\text{C}_2\text{H}_2$  применяется в автономных приборах освещения (источник яркого белого света в лампах маяков, освещения судов и др.) Ацетилен используется в медицине (компонент для наркоза, биомаркер курения в выдыхаемом воздухе [4]), промышленности (получение продуктов органического синтеза: кислот, каучука, полимеров, растворителей и т.д.). При горении ацетилен образуется в процессе окисления углеводородного топлива и выступает в качестве предшественника образования сажи, обладающей канцерогенным действием [5]. Количественные измерения содержания  $\text{C}_2\text{H}_2$  в процессах горения

имеют решающее значение для оценки воздействия различных видов топлива на окружающую среду [6].

В земной атмосфере  $\text{C}_2\text{H}_2$  является одной из малых газовых составляющих и образуется, главным образом, в процессе фотодиссоциации метана [7] и при сжигании ископаемого топлива. В незагрязненном воздухе содержание его весьма мало ( $< 0.5 \text{ ppbV}$ ). Однако в связи с бурным ростом автомобильного транспорта в будущем можно ожидать заметного увеличения концентрации  $\text{C}_2\text{H}_2$  в атмосфере [7]. Как следствие, в перспективе, ацетилен может стать еще одним парниковым газом.

В силу сказанного исследование спектров  $\text{C}_2\text{H}_2$  в различных смесях в широком диапазоне температур имеет важную научную и практическую ценность. Многочисленные экспериментальные и теоретические исследования инфракрасных (ИК) спектров ацетилена были посвящены уширению колебательно-вращательных линий в различных основных и комбинационных полосах в смеси с  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2$  и благородными газами [8–22]. В работах [15,16] приведена исчерпывающая обзорная информация об уширении линий  $\text{C}_2\text{H}_2$  азотом, имеющая прямое отношение к земной атмосфере.

В последние десятилетия значительно возрос интерес к самоуширению линий ацетилена. Коэффициенты самоуширения  $\text{C}_2\text{H}_2$  исследовались экспериментально и/или теоретически (главным образом, в рамках полуклассического метода Робера-Бонами) в различных полосах по-

глощения:  $\nu_5$  [23–25],  $\nu_4 + \nu_5$  [26–28],  $2\nu_4 + \nu_5$  и  $3\nu_5$  [26],  $\nu_1 + \nu_5$  [9,29],  $\nu_1 + 3\nu_3$  [30–33],  $\nu_1 + \nu_3$  [34–43],  $5\nu_3$  [44],  $\nu_1 + \nu_2 + \nu_4 + \nu_5$  [45,46],  $\nu_1 + \nu_3 + \nu_4 - \nu_4$  [47]. Из-за экспериментальных трудностей большинство измерений проводилось в относительно узких температурных интервалах (большей частью при комнатной температуре и ниже) и ограниченных диапазонах вращательного квантового числа  $J$ .

В настоящей работе для расчета самоуширения колебательно-вращательных линий поглощения и изотропного рамановского (комбинационного) рассеяния ацетилена используется классическая ударная теория Гордона. Рассчитаны  $J$ -зависимости коэффициентов самоуширения линий  $\text{C}_2\text{H}_2$  ( $J \leq 40$ ) в диапазоне температур от 150 до 700 К. Проведено сравнение с отдельными экспериментальными данными. Проанализирован вклад в уширение столкновений различных типов (упругих, неупругих, столкновительных комплексов), а также роль электрического квадрупольного момента  $\text{C}_2\text{H}_2$ .

Статья организована следующим образом. В разд. 2 приведены базовые уравнения динамики столкновений и классической ударной теории изолированных спектральных линий. В разд. 3 описана поверхность потенциальной энергии межмолекулярного взаимодействия  $\text{C}_2\text{H}_2$ – $\text{C}_2\text{H}_2$ , используемая в расчетах. Детали траекторных расчетов даны в разд. 4. Результатам и их обсуждению посвящен разд. 5. В разд. 6 сформулированы выводы.

## 2. Основные уравнения

### 2.1. Динамика столкновений

Рассмотрим систему взаимодействующих квазидвухатомных линейных молекул (ротаторов) BC („1“, активная молекула) и AD („2“, буферная молекула) (рис. 1). Геометрия столкновения может быть описана с помощью следующих переменных: вектора межмолекулярного расстояния  $\mathbf{R}(t)$ , направленного из центра масс ротатора BC в центр масс ротатора AD, и двумя наборами молекулярно-фиксированных координат  $(x_1, y_1, z_1)$  и  $(x_2, y_2, z_2)$ , задающих ориентацию векторов  $\mathbf{r}_1$  и  $\mathbf{r}_2$  осей молекул в их собственных системах координат. Центры молекулярно-фиксированных координат расположены на одном из концевых атомов соответствующей молекулы (B и A), при этом оси  $z_1, z_2$  систем координат всегда направлены вдоль вектора  $\mathbf{R}$ . Центр масс ротатора AD поконится, ротатор BC имеет начальную относительную скорость  $v$ , вектор которой параллелен оси  $Z$  лабораторной системы координат.

Точный 3D-классический гамильтониан для системы жестких ротаторов BC–AD имеет вид

$$H = T + V(\mathbf{R}, \mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2), \quad (1)$$

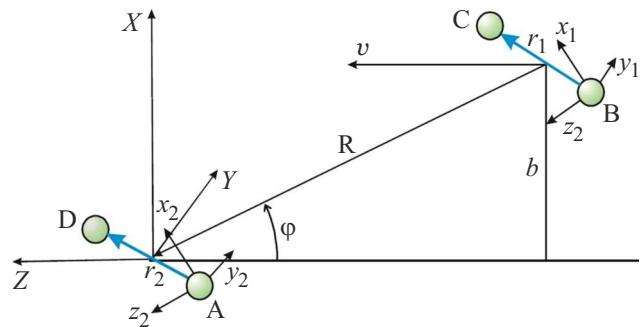


Рис. 1. Схема столкновения ротатор „1“ (BC)–ротатор „2“ (AD) [48]. ( $X, Y, Z$ ) — лабораторная система координат;  $(x_1, y_1, z_1)$  и  $(x_2, y_2, z_2)$  — молекулярно-фиксированные системы координат.

$$T = \frac{p_R^2}{2\mu_{AD,BC}} + \frac{L^2}{2\mu_{AD,BC}R^2} + \frac{p_{x1}^2 + p_{y1}^2 + p_{z1}^2}{2\mu_{BC}}$$

$$+ \frac{p_{x2}^2 + p_{y2}^2 + p_{z2}^2}{2\mu_{AD}},$$

$$L^2 = \mu_{AD,BC}R^4(\dot{\theta}^2 \sin^2 \varphi + \dot{\phi}^2).$$

Здесь  $T$  — кинетическая энергия системы AD–BC,  $L$  и  $\mu_{AD,BC}$  — орбитальный момент и приведенная масса сталкивающейся пары,  $\mu_{BC}$  и  $\mu_{AD}$  — приведенные массы молекул BC и AD. Угол  $\varphi$  — угол возвышения (угол между вектором  $\mathbf{R}$  и плоскостью  $YZ$  лабораторной системы координат),  $\theta$  — угол поворота плоскости столкновения относительно исходного положения (подробнее см. [48]). Межмолекулярный потенциал взаимодействия  $V(\mathbf{R}, \mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = V(R, \gamma_1, \gamma_2, \phi)$  является четырехмерным. Он определяется координатами Якоби — расстоянием между центрами масс  $R$  и тремя ориентационными углами:  $\gamma_1, \gamma_2$  ( $\gamma_1$  — угол между векторами  $\mathbf{R}$  и  $\mathbf{r}_1$ ,  $\gamma_2$  — между  $\mathbf{R}$  и  $\mathbf{r}_2$ ) и углом  $\phi$  между плоскостями, где лежат векторы  $\mathbf{R}$ ,  $\mathbf{r}_1$  и  $\mathbf{r}_2$  (так называемый угол „закрутки“). Отметим, что в случае одинаковых молекул  $r_1 = r_2$  и  $\mu_{BC} = \mu_{AD}$ .

Уравнения Гамильтона, описывающие классическую динамику системы AD–BC, имеют стандартный [49] вид:

$$\dot{q}_i = \frac{\partial H}{\partial p_i}, \quad \dot{p}_i = -\frac{\partial H}{\partial q_i}, \quad i = 1, 2, \dots, i_{\max}, \quad (2)$$

где  $q_i$  и  $p_i$  — обобщенные координаты и сопряженные импульсы. В рассматриваемом случае двух жестких ротаторов  $i_{\max} = 9$  ( $q_1 - q_9 = R, \phi, \theta, x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2; p_1 - p_9 = p_R, p_\phi, p_\theta, p_{x1}, p_{y1}, p_{z1}, p_{x2}, p_{y2}, p_{z2}$ ),  $(x_1, y_1, z_1)$  — координаты атома С относительно атома B и  $(x_2, y_2, z_2)$  — координаты атома D относительно атома A (подробнее см. [48]). Подставляя гамильтониан (1) в уравнения (2), получаем 17 (так как  $p_\theta = \text{const}$ ) точных самосогласованных классических уравнений движения, явный вид которых приведен в Приложении в конце статьи. Отметим,

что в отечественной литературе данные уравнения публикуются впервые.

## 2.2. Базовые формулы классической ударной теории

В классической ударной теории Гордона полуширина  $\gamma$  изолированной колебательно-вращательной линии электрического дипольного поглощения описывается [50] формулой

$$\gamma = \frac{n_b}{2\pi c} \left\langle v [1 - P_{el} \cos \eta \cos^2(\alpha/2)] \right\rangle_{b,v,O,\omega_2}. \quad (3)$$

В (3) учитывается вклад как неупругих, так и упругих столкновений. Для  $Q$ -линий изотропного рамановского (комбинационного) рассеяния важен вклад только вращательно-неупругих столкновений [50,51]:

$$\gamma = \frac{n_b}{2\pi c} \left\langle v (1 - P_{el}) \right\rangle_{b,v,O,\omega_2}. \quad (4)$$

В уравнениях (3), (4)  $n_b$  — числовая плотность возмущающих частиц (здесь — всех остальных молекул  $\text{C}_2\text{H}_2$ , окружающих рассматриваемую),  $c$  — скорость света.  $P_{el}$  — вероятность (индекс) того, что данное столкновение является упругим/неупругим. Как показано в [48] на примере молекулы  $\text{N}_2$ , наилучшие результаты (в смысле совпадения с экспериментом) достигаются, если  $P_{el}$  вычислять с помощью процедуры бокс-квантования ( $P_{el} = 1$  для упругих столкновений и  $P_{el} = 0$  для неупругих). Статистическое усреднение  $\langle \dots \rangle$  проводится по прицельному параметру  $b$ , относительной скорости пары  $v$ , начальным ориентациям  $O$  единичных векторов молекулярных осей  $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$  обеих молекул и их угловых скоростей  $\omega_1, \omega_2$ , а также по модулю  $\omega_2$ . Угол  $\eta$  характеризует „дефазировку вращения“, а  $\alpha$  — угол между начальной и конечной ориентацией вектора  $\omega_1$  („деориентация вращения“). Значения  $\eta$  и  $\alpha$  вычисляются из классической динамики каждого конкретного столкновения модифицированным методом, описанным в Приложении работы [52]. В формулах (3), (4) не учитывается колебательный фазовый сдвиг (так называемая „колебательная дефазировка“ [51]), поскольку молекулы считаются жесткими. Это приближение в рассматриваемом нами случае является вполне приемлемым, так как измерения уширения в целом ряде полос ацетилена демонстрируют слабую колебательную зависимость [26,28].

## 3. Межмолекулярный потенциал взаимодействия $\text{C}_2\text{H}_2-\text{C}_2\text{H}_2$

В настоящих классических расчетах использовалась простая поверхность потенциальной энергии (ППЭ) межмолекулярного взаимодействия  $\text{C}_2\text{H}_2-\text{C}_2\text{H}_2$  типа

Параметры атом-атомного потенциала  $V_{aa}$  для системы  $\text{C}_2\text{H}_2-\text{C}_2\text{H}_2$  [24]

$e_{ij}$ ( $10^{-11}$ erg Å $^6$ )	$d_{ij}$ ( $10^{-8}$ erg Å $^{12}$ )	$r_{1i}$ (Å)
$e_{\text{H-H}} = 0.235$	$d_{\text{H-H}} = 0.117$	$ r_{1\text{H}}  = 1.6614$
$e_{\text{H-C}} = 0.419$	$e_{\text{H-C}} = 0.202$	
$e_{\text{C-C}} = 0.747$	$d_{\text{C-C}} = 0.349$	$ r_{1\text{C}}  = 0.6035$

атом-атом + квадруполь-квадруполь ( $aa + QQ$ ) из работы Ламбо с соавторами [24]:

$$V(\mathbf{R}, \mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = V_{aa}(\mathbf{R}, \mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) + V_{QQ}(\mathbf{R}, \mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2). \quad (5)$$

Член атом-атомного взаимодействия имеет вид

$$V_{aa} = \sum_{i,j} \left( \frac{d_{ij}}{r_{1i,2j}^{12}} - \frac{e_{ij}}{r_{1i,2j}^6} \right), \quad (6)$$

где  $r_{1i,2j}$  — расстояния между атомом  $i$  молекулы „1“ и атомом  $j$  молекулы „2“,  $e_{ij}$  и  $d_{ij}$  — параметры для соответствующей атомной пары. Член дальнодействующего квадруполь-квадрупольного взаимодействия описывается стандартным образом [53]:

$$V_{QQ} = \frac{3Q_1Q_2}{4R^5} f(\gamma_1, \gamma_2, \varphi_1, \varphi_2), \quad (7)$$

$$\begin{aligned} f(\gamma_1, \gamma_2, \varphi_1, \varphi_2) &= \\ &= 1 - 5(\cos^2 \gamma_1 + \cos^2 \gamma_2 + 3 \cos^2 \gamma_1 \cos^2 \gamma_2) \\ &+ 2[4 \cos \gamma_1 \cos \gamma_2 - \sin \gamma_1 \sin \gamma_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)]^2. \end{aligned}$$

Здесь  $Q_1, Q_2$  — электрические квадрупольные моменты молекул „1“ и „2“;  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  — углы между осями молекул  $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$  и вектором  $\mathbf{R}$  (полярные углы);  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  — соответствующие азимутальные углы в молекулярно-фиксированных системах координатах молекул „1“ (BC) и „2“ (AD). Отметим еще раз, что оси  $z_1$  и  $z_2$  молекулярно-фиксированных систем координат всегда направлены вдоль вектора  $\mathbf{R}$ .

В рассматриваемом случае системы  $\text{C}_2\text{H}_2-\text{C}_2\text{H}_2$  молекулы „1“ и „2“ идентичны и, следовательно,  $Q_1 = Q_2 = Q$ . Коэффициенты  $e_{ij}, d_{ij}$  и внутримолекулярные расстояния  $r_{1\text{H}}, r_{1\text{C}}$  (расстояния от центра масс молекулы  $\text{H}-\text{C}=\text{C}-\text{H}$  до атомов  $\text{H}$  и  $\text{C}$  соответственно) приведены в таблице.

Как и в [24], для электрического квадрупольного момента  $\text{C}_2\text{H}_2$  в расчетах использовалось значение  $Q = 5.42 \text{ D}\text{\AA}$  ( $5.42 \pm 0.41 \text{ D}\text{\AA}$  по измерениям [54]). Гексадекапольным моментом  $\text{C}_2\text{H}_2$  и мультипольными моментами более высоких порядков в настоящих расчетах пренебрегалось.

#### 4. Детали траекторных расчетов

Классические траекторные расчеты 3D (C3D) были выполнены с использованием метода, подробно описанного ранее для системы  $\text{N}_2-\text{N}_2$  [48]. Была внесена лишь коррекция, связанная с буферной молекулой (также  $\text{C}_2\text{H}_2$ ): ее начальные  $J_2$ -состояния ( $J_2$  — вращательное квантовое число молекулы AD) выбирались дискретным образом с учетом вырождения по ядерному спину  $g_1 = (-1)^{J_2+1} + 2$ . В результате для *ортогруевней*  $\text{C}_2\text{H}_2$  (нечетные  $J_2$ ) имеем  $g_1 = 3$ , а для *парагруевней* (четные  $J_2$ )  $g_1 = 1$ . Однако эта модификация не привела к заметному отличию результатов в сравнении с непрерывным выбором начальных  $J_2$ -состояний без учета спинового вырождения.

Начальная угловая частота вращения  $\omega_1$  целевой молекулы BC определялась через начальное вращательное квантовое число  $J$  (коррекция или „предписание“ Лангера [55,56]) с использованием среднего значения  $J$  для рассматриваемого оптического перехода [50,51]:

$$i\omega_1 = \hbar \left( J_{\text{average}} + \frac{1}{2} \right), \quad (8)$$

где  $I$  — момент инерции ротатора,  $\hbar$  — постоянная Планка. Значения  $J_{\text{average}}$  для различных ветвей колебательно-вращательной полосы следующие:

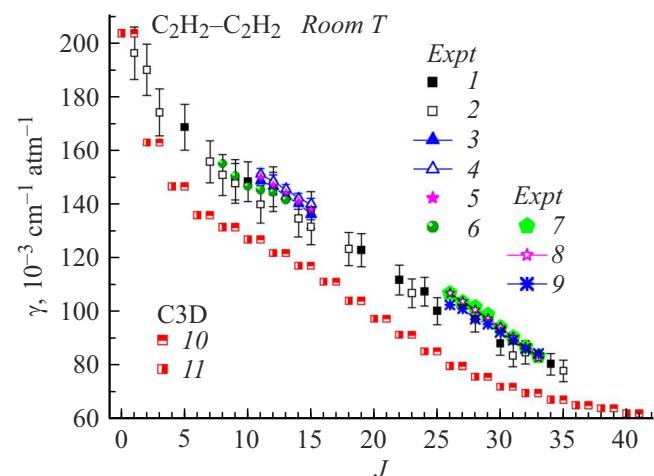
$$P - \text{линии}, \Delta J = -1, J_{\text{average}} = \frac{J + (J - 1)}{2} = J - 1/2,$$

$$Q - \text{линии}, \Delta J = 0, J_{\text{average}} = \frac{J + 1}{2} = J,$$

$$R - \text{линии}, \Delta J = +1, J_{\text{average}} = \frac{J + (J + 1)}{2} = J + 1/2. \quad (9)$$

Коррекция Лангера в форме (8),(9) обеспечивает лучшие (в смысле согласия с экспериментом) коэффициенты уширения для малых значений  $J$  (особенно для  $J = 0$ ), чем традиционная формула квантования углового момента [57]. С ростом  $J$  влияние этой коррекции быстро нивелируется.

Метод Монте-Карло использовался для выбора начальных ориентаций векторов  $\mathbf{r}_1$ ,  $\mathbf{r}_2$  и  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ , равномерно распределенных в 3D-пространстве при условии ортогональности  $\mathbf{r}_1 \perp \omega_1$ ,  $\mathbf{r}_2 \perp \omega_2$ . Во всех расчетах применялось усреднение Максвелла по начальной относительной скорости в интервале  $v = (0.01 \div 3)v_p$ , где  $v_p = (2k_B T / \mu_{\text{AD,BC}})^{1/2}$  — наиболее вероятная относительная скорость сталкивающейся пары ( $T$  — температура,  $k_B$  — постоянная Больцмана,  $\mu_{\text{AD,BC}} = 13$  а.м.и. для  $^{12}\text{C}_2\text{H}_2 - ^{12}\text{C}_2\text{H}_2$ ). Максимальный прицельный параметр был установлен  $b_{\text{max}} = 12 \text{ \AA}$ . Среднеквадратичная погрешность расчетных полуширин линий поддерживалась на уровне менее 1%. Вспомогательные расчеты при  $b_{\text{max}} = 10, 12, 14 \text{ \AA}$  и  $T = 150 \text{ K}$ , а также при  $b_{\text{max}} = 12, 13 \text{ \AA}$  и  $T = 298 \text{ K}$  показали, что диапазон прицельного параметра  $b \leq b_{\text{max}} = 12 \text{ \AA}$  является вполне



**Рис. 2.** Самоуширение линий поглощения  $\text{C}_2\text{H}_2$ : сравнение расчетов C3D с экспериментом при комнатной температуре. Эксперимент: 1 —  $v_5$  *P*-ветвь [24] ( $T = 298 \text{ K}$ ), 2 —  $v_5$  *R*-ветвь [24] ( $T = 298 \text{ K}$ ), 3 — линии в *P*-ветви полосы  $v_1 + v_3$  [37] контур Фойгта, 4 — [37] контур Раутиана, 5 — [37] — HITRAN2008 ( $T = 296 \text{ K}$ ), 6 — [41], линии в *R*-ветви полосы  $v_1 + v_3$  ( $T = 295 \div 300 \text{ K}$ ), 7 — [28] ( $T = 296 \text{ K}$ ), 8 — [28] — HITRAN2012, 9 — [28,26]. Настоящие C3D-расчеты ( $T = 298 \text{ K}$ ): 10 — *P*-ветвь, 11 — *R*-ветвь. ППЭ типа  $aa + QQ$ ,  $Q = 5.42 \text{ \AA}$ .

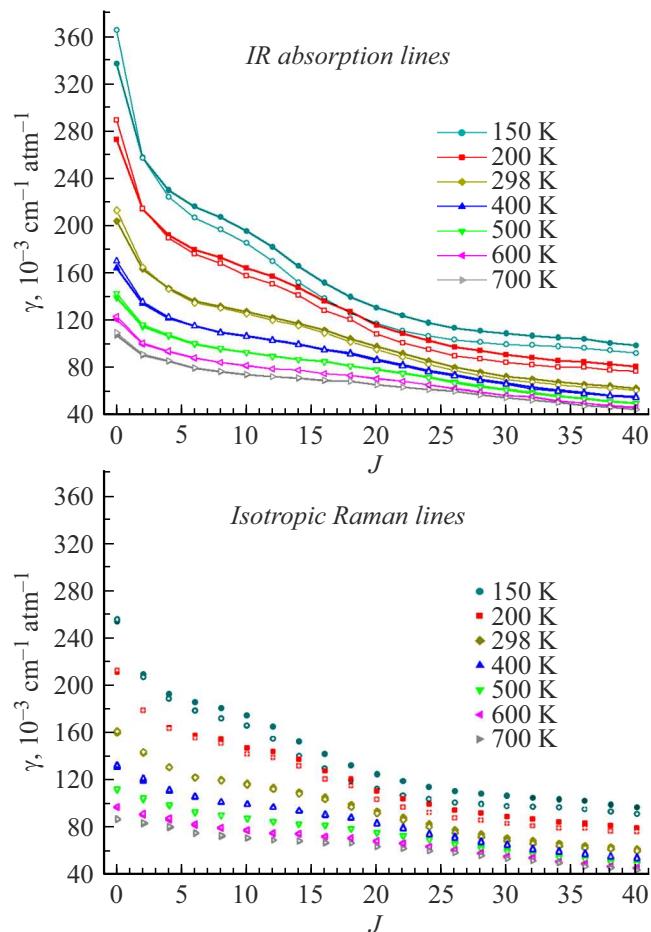
достаточным для моделирования самоуширения линий  $\text{C}_2\text{H}_2$  при температурах 150–700 K.

Во всех расчетах применялся эффективный алгоритм [56] розыгрыша прицельного параметра  $b$ . Сходимость метода Монте-Карло в этом случае оказывается примерно в два раза быстрее, чем при традиционном равномерном розыгрыше по  $b^2$ . Расчеты показали, что законы сохранения энергии и момента импульса выполняются с высокой точностью на подавляющем числе траекторий.

Уравнения Гамильтона численно интегрировались с помощью стандартной процедуры библиотеки IMSL (неявный BDF-метод Гира [58]). Вычисления выполнялись с использованием двойной точности с типичным параметром устойчивости  $\text{TOL} = 10^{-8}$  и переменным шагом интегрирования внутри фиксированных интервалов  $\Delta t = 5 \text{ ps}$  сетки по времени. Траектории начинались и заканчивались при  $R_{\text{max}} = 15 \text{ \AA}$ .

#### 5. Результаты и обсуждение

Результаты C3D-расчетов и измерений коэффициентов самоуширения линий поглощения  $\text{C}_2\text{H}_2$  при комнатной температуре сравниваются на рис. 2. Базовые экспериментальные данные соответствуют табл. 1 работы [24]. Основные источники погрешности в измерении коэффициентов уширения возникали из-за неточности положения базовой линии и наличия слабых перекрывающихся переходов, принадлежащих, главным образом,

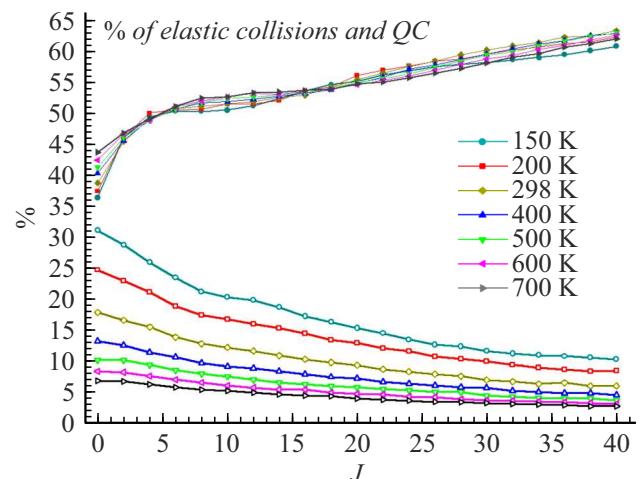


**Рис. 3.** (a) Самоуширение ИК линий поглощения полосы  $\nu_5$   $\text{C}_2\text{H}_2$ ; (b) самоуширение  $Q$ -линий изотропного комбинационного рассеяния  $\text{C}_2\text{H}_2$ . Расчеты C3D с использованием  $aa + QQ$  ППЭ при различных температурах. Сплошные символы — учет столкновений всех типов, открытые символы — без учета столкновительных комплексов.  $Q = 5.42 \text{ \AA}$ .

горячим полосам  $2\nu_5 - \nu_5$  и  $\nu_4 + \nu_5 - \nu_4$ . Относительная ошибка  $\gamma$  по оценкам авторов [24] составила  $\leq 5\%$ .

На рис. 3, a представлены результаты C3D-расчетов самоуширения линий поглощения  $\text{C}_2\text{H}_2$  при различных температурах, а на рис. 3, b — результаты аналогичных расчетов для случая  $Q$ -линий изотропного рассеяния. В целях сравнения масштаб вертикальной оси рисунков сделан одинаковым. На рис. 4 показаны доли упругих столкновений и столкновительных комплексов (иначе — метастабильных димеров, или резонансов Фешбаха, или квазисвязанных комплексов (quasibound complexes, QC)) в общем числе столкновений при различных  $J$  и  $T$  (подробнее о QC см., например, [59]).

Сравнение рис. 3, a и b показывает, что вклад упругих соударений в самоуширение линий  $\text{C}_2\text{H}_2$  зависит от  $J$  и  $T$  (напомним, что на уширение ИК линий поглощения влияют столкновения всех типов, а на уширение  $Q$ -линий — изотропного комбинационного рассеяния — только неупругие). Особенно заметно увеличение  $\gamma$  за

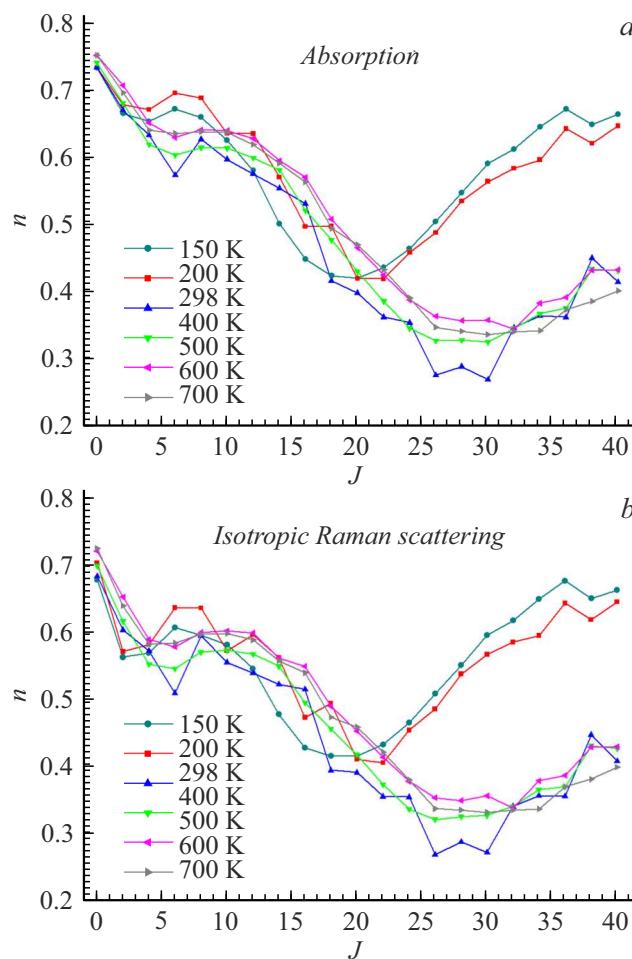


**Рис. 4.** Доли упругих столкновений (сплошные символы) и QC (открытые символы) в общем числе столкновений как функции  $J$  при различных  $T$ .

счет упругих столкновений при малых  $J$  и  $T$ . Доля упругих соударений растет с ростом  $J$ , достигая 60% при  $J = 35$  (рис. 4). Также оказалось, что даже при комнатной температуре образуется довольно много столкновительных комплексов (рис. 4), однако их вклад в уширение является существенным лишь при низких температурах. Интересно, что при  $J = 0$  квазикомплексы уменьшают уширение, а при  $J > 2$ , наоборот, увеличивают (природа такого эффекта пока неясна). Влияние QC на уширение линий рассеяния несколько меньше, чем в случае линий поглощения, поскольку в этом случае важны только неупругие столкновения.

Результаты рис. 3, a, b позволяют определить показатель  $n$  температурной зависимости уширения линий. Традиционно используют формулу  $\gamma(T) = \gamma(T_{\text{ref}})(T_{\text{ref}}/T)^n$ , из которой  $n = \ln[\gamma(T)/\gamma(T_{\text{ref}})]/\ln(T_{\text{ref}}/T)$ , где  $T_{\text{ref}}$  — некоторая референсная (опорная) температура. Для настоящих расчетов она была выбрана равной 298 K. На рис. 5, a приведены результаты C3D-расчетов коэффициента  $n$  для линий поглощения, а на рис. 5, b — для изотропного рассеяния.

Из рис. 5 следуют три важных вывода: (1) показатель  $n$  существенно зависит от вращательного квантового числа  $J$ , (2) характер зависимости  $n(J)$  практически одинаков для линий поглощения и рассеяния с небольшими отличиями лишь в численных значениях, (3) коэффициент  $n$  существенно зависит от температуры. Также наблюдается следующий интересный эффект: для  $J > 20$  зависимость  $n(J)$  — возрастающая функция при  $T < 200$  K, а при  $T > 400$  K — убывающая (за исключением больших  $J$ ). Этот эффект, конечно, требует дополнительного исследования. Вывод (3) свидетельствует о неадекватности традиционно используемой формулы для зависимости  $\gamma(T)$ . Несмотря на это, применение постоянных значений  $n$  для описания



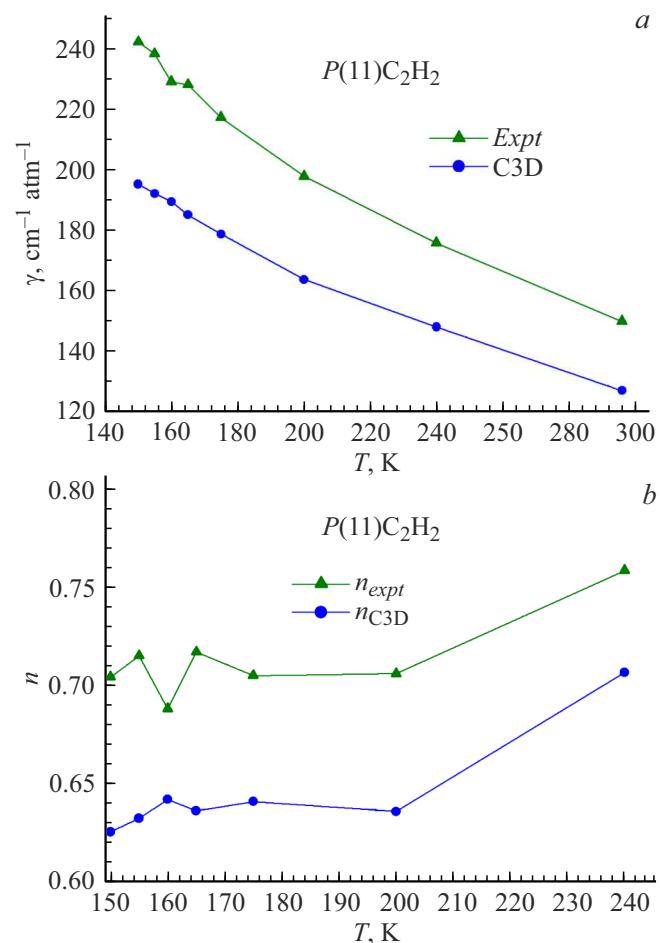
**Рис. 5.** Коэффициент температурной зависимости  $n$  самоуширения линий поглощения  $\text{C}_2\text{H}_2$  (a) и  $Q$ -линий изотропного комбинационного рассеяния (b) для различных  $J$ , рассчитанный при разных температурах.  $\gamma(T) = \gamma(T_{\text{ref}})(T_{\text{ref}}/T)^n$ .  $T_{\text{ref}} = 298$  K.

температурных зависимостей уширения используется очень часто. Так, например, в [26] в аппроксимационной формуле для  $\gamma_{\text{self}}(J, T)$  для широкого диапазона  $J$  ( $|m| \leq 34$ ) коэффициент  $n = 0.75$  для всех  $|m|$ . Отметим, что эта удобная формула, полученная путем обработки результатов измерений для нескольких полос  $\text{C}_2\text{H}_2$ , справедлива лишь для температур, близких к комнатной.

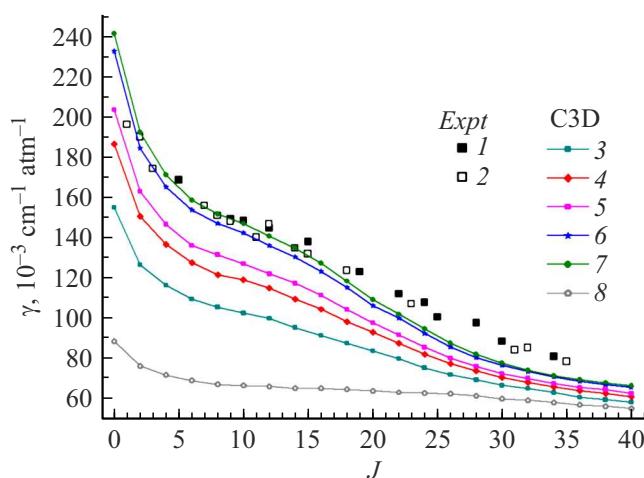
Сравнение рассчитанных по методу C3D зависимостей  $\gamma(T)$  и  $n(T)$  с экспериментом представлено на рис. 6. Экспериментальные данные [42] получены путем обработки измеренного спектра линии поглощения  $\nu_1 + \nu_3$   $P(11)$   $\text{C}_2\text{H}_2$  с использованием зависящего от скорости контура Фойгта (SDV profile). Результаты рис. 6, b получены из данных рис. 6, a. Из рис. 6 видно, что характер зависимостей  $\gamma(T)$  и  $n(T)$  одинаков для расчетов C3D и эксперимента. Различия лишь в численных значениях.

Представляет интерес определить в рамках классического подхода влияние значения электрического квад-

ропольного момента на уширение линий ацетилена, поскольку при теоретическом моделировании различные авторы используют самые разные значения. Известные из литературы значения квадрупольного момента  $\text{C}_2\text{H}_2$  варьируют от 3 до  $8.4 \text{ D}\ddot{\text{A}}$  [45, 60]. В настоящей работе, как и в [24], для расчета коэффициентов самоуширения использовано измеренное в [54] значение  $Q = 5.42 \text{ D}\ddot{\text{A}}$ . Другие (большие) экспериментальные и расчетные значения квадрупольного момента  $\text{C}_2\text{H}_2$  приведены в [61]: 6.15 [62], 6.53 [63],  $7.35 \text{ D}\ddot{\text{A}}$  [64]. На рис. 7 показаны зависимости  $\gamma(J)$ , рассчитанные при различных значениях  $Q$ . Видно, что значение квадрупольного момента заметно увеличивает самоуширение, особенно при малых и промежуточных  $J$ . Вклад атом-атомной части ППЭ в уширение мал (рис. 7 при  $Q = 0$  — кривая 8). Решающую роль в формировании  $J$ -зависимости играет именно квадруполь-квадрупольное взаимодействие. Аналогичный результат получен в [24] в рамках полуклассического метода Робера-Бонами.



**Рис. 6.** (a) Коэффициент самоуширения  $\gamma(T)$  линии поглощения  $P(11)$  полосы  $\nu_1 + \nu_3$   $\text{C}_2\text{H}_2$ , эксперимент [42]; (b) коэффициент  $n(T)$  температурной зависимости самоуширения линии поглощения  $P(11)$   $\nu_1 + \nu_3$   $\text{C}_2\text{H}_2$ . Для эксперимента [42]  $T_{\text{ref}} = 296$  K, для расчетов C3D  $T_{\text{ref}} = 298$  K. Эксперимент — треугольники, расчеты — кружки.



**Рис. 7.** Влияние значения квадрупольного момента  $\text{C}_2\text{H}_2$  на самоуширение линий поглощения.  $T = 298$  К. Эксперимент: 1 —  $v_5 P$ -ветвь [24], 2 —  $v_5 R$ -ветвь [24]. Расчет C3D:  $Q = 3$  (3), 4.5 (4), 5.42 (5), 7.35 (6), 8.4 Д $\text{\AA}$  (7);  $Q = 0$  (8).

Количественные различия результатов классической ударной теории и эксперимента связаны, по-видимому, с несовершенством использованной в расчетах C3D межмолекулярной ППЭ (как в атом–атомной, так и в дальнодействующей частях). Как видно из вышеприведенного анализа, даже (казалось бы) такая простая величина, как квадрупольный момент, до сих пор неизвестна достаточно точно для  $\text{C}_2\text{H}_2$ , хотя сильно влияет на самоуширение. Что касается мультипольных моментов более высокого порядка (гексадекапольного и выше), то их неопределенность еще больше.

## 6. Заключение

Поскольку существует уже довольно много теоретических работ по самоуширению линий  $\text{C}_2\text{H}_2$ , возникает вопрос о ценности представленных в данной статье результатов. В этой связи отметим следующее. Повавляющее большинство расчетных исследований ударного уширения колебательно-вращательных линий молекул выполнено с помощью полуклассических методов Андерсона–Цао–Карната (ATC) и/или Робера–Бонами (RB) в их различных (в том числе недавно модифицированных) вариантах [7,22]. Эти методы базируются на ряде упрощающих приближений, искажающих физику столкновительного уширения (на них указано, например, в [17–22,48,52,57]). Однако эти недостатки легко компенсируются выбором соответствующих подгоночных параметров ППЭ более или менее приемлемого вида для согласия с теми или иными результатами измерений, что и делается в большинстве теоретических работ. Ясно, что в рамках такого подхода физика процесса уширения остается „за кадром“, а предсказательная сила расчетов для других условий — сомнительной. К тому же разброс различных экспериментальных данных

может быть значительным (для самоуширения  $\text{C}_2\text{H}_2$  см., например, [24]). Поэтому ясно, что корректное моделирование ударного уширения возможно только в рамках самосогласованного подхода (полностью квантового либо классического) с использованием надежной, максимально точной ППЭ. К сожалению, самосогласованность и точность полностью квантовых методов достигается за счет весьма длительных вычислений, связанных с решением систем связанных дифференциальных уравнений большой размерности. Возникают также проблемы сходимости результатов. Практические применения наиболее точных квантовых CC/CS-схем даже сейчас ограничены простыми молекулярными системами при невысоких температурах. В этой связи развитие классического метода в теории столкновительного уширения является актуальным. В то же время полученные в данной работе результаты никак не следует рассматривать как базовые, а лишь как демонстрацию возможностей классического подхода к проблеме уширения и как „навигацию“ для будущих теоретических и экспериментальных исследований в различных условиях. Отметим также, что для устранения неопределенностей в интерпретации экспериментальных данных необходимым является дальнейшее совершенствование квантовохимических методов получения максимально точных неэмпирических ППЭ.

## Благодарности

Автор признателен О.Г. Бузыкину за помощь в численных расчетах.

## Финансирование работы

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ „Курчатовский институт“.

## Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

## Приложение

Точные 3D-классические уравнения движения для системы двух жестких линейных молекул BC–AD (A, B, C, D — концевые атомы) в молекулярно-фиксированных координатах имеют следующий вид:

$$\dot{R} = \frac{p_R}{\mu_{AD,BC}}, \quad (П1)$$

$$\dot{\varphi} = \frac{(p_\varphi - J_y)}{\mu_{AD,BC} R^2}, \quad (П2)$$

$$\dot{p}_R = \frac{(A + p_\theta)^2}{\mu_{AD,BC} R^3 \sin^2 \varphi} + \frac{(J_y - p_\varphi)^2}{\mu_{AD,BC} R^3} - \frac{\partial V}{\partial R}, \quad (П3)$$

$$\dot{x}_1 = \frac{p_{x1}}{\mu_{BC}} + \frac{y_1 \cos \varphi (A + p_\theta)}{\mu_{AD,BC} R^2 \sin^2 \varphi} + \frac{z_1 (J_y - p_\varphi)}{\mu_{AD,BC} R^2}, \quad (\text{П4})$$

$$\dot{y}_1 = \frac{p_{y1}}{\mu_{BC}} - \frac{(x_1 \cos \varphi + z_1 \sin \varphi) (A + p_\theta)}{\mu_{AD,BC} R^2 \sin^2 \varphi}, \quad (\text{П5})$$

$$\dot{z}_1 = \frac{p_{z1}}{\mu_{BC}} + \frac{y_1 \sin \varphi (A + p_\theta)}{\mu_{AD,BC} R^2 \sin^2 \varphi} - \frac{x_1 (J_y - p_\varphi)}{\mu_{AD,BC} R^2}, \quad (\text{П6})$$

$$\dot{p}_{x1} = \frac{p_{y1} \cos \varphi (A + p_\theta)}{\mu_{AD,BC} R^2 \sin^2 \varphi} + \frac{p_{z1} (J_y - p_\varphi)}{\mu_{AD,BC} R^2} - \frac{\partial V}{\partial x_1}, \quad (\text{П7})$$

$$\dot{p}_{y1} = -\frac{(p_{x1} \cos \varphi + p_{z1} \sin \varphi) (A + p_\theta)}{\mu_{AD,BC} R^2 \sin^2 \varphi} - \frac{\partial V}{\partial y_1}, \quad (\text{П8})$$

$$\dot{p}_{z1} = \frac{p_{y1} \sin \varphi (A + p_\theta)}{\mu_{AD,BC} R^2 \sin^2 \varphi} - \frac{p_{x1} (J_y - p_\varphi)}{\mu_{AD,BC} R^2} - \frac{\partial V}{\partial z_1}, \quad (\text{П9})$$

$$\dot{\theta} = \frac{(p_\theta + A)}{\mu_{AD,BC} R^2 \sin^2 \varphi}, \quad (\text{П10})$$

$$\dot{p}_\varphi = \frac{\cos \varphi (A + p_\theta)^2}{\mu_{AD,BC} R^2 \sin^3 \varphi} - \frac{B (A + p_\theta)}{\mu_{AD,BC} R^2 \sin^2 \varphi}, \quad (\text{П11})$$

$$\dot{x}_2 = \frac{p_{x2}}{\mu_{AD}} + \frac{y_2 \cos \varphi (A + p_\theta)}{\mu_{AD,BC} R^2 \sin^2 \varphi} + \frac{z_2 (J_y - p_\varphi)}{\mu_{AD,BC} R^2}, \quad (\text{П12})$$

$$\dot{y}_2 = \frac{p_{y2}}{\mu_{AD}} - \frac{(x_2 \cos \varphi + z_2 \sin \varphi) (A + p_\theta)}{\mu_{AD,BC} R^2 \sin^2 \varphi}, \quad (\text{П13})$$

$$\dot{z}_2 = \frac{p_{z2}}{\mu_{AD}} + \frac{y_2 \sin \varphi (A + p_\theta)}{\mu_{AD,BC} R^2 \sin^2 \varphi} - \frac{x_2 (J_y - p_\varphi)}{\mu_{AD,BC} R^2}, \quad (\text{П14})$$

$$\dot{p}_{x2} = \frac{p_{y2} \cos \varphi (A + p_\theta)}{\mu_{AD,BC} R^2 \sin^2 \varphi} + \frac{p_{z2} (J_y - p_\varphi)}{\mu_{AD,BC} R^2} - \frac{\partial V}{\partial x_2}, \quad (\text{П15})$$

$$\dot{p}_{y2} = \frac{(p_{x2} \cos \varphi + p_{z2} \sin \varphi) (A + p_\theta)}{\mu_{AD,BC} R^2 \sin^2 \varphi} - \frac{\partial V}{\partial y_2}, \quad (\text{П16})$$

$$\dot{p}_{z2} = \frac{p_{y2} \sin \varphi (A + p_\theta)}{\mu_{AD,BC} R^2 \sin^2 \varphi} - \frac{p_{x2} (J_y - p_\varphi)}{\mu_{AD,BC} R^2} - \frac{\partial V}{\partial z_2}, \quad (\text{П17})$$

$\mu_{AD,BC}$  — приведенная масса системы AD–BC;  $\mu_{AD}$ ,  $\mu_{BC}$  — приведенные массы молекул AD и BC;  $V = V(\mathbf{R}, \mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2)$  — потенциал взаимодействия между молекулами AD и BC.  $\dot{p}_\theta = 0$ ,  $p_\theta = \mu_{AD,BC} R^2 \dot{\theta} \sin^2 \varphi - A = \text{const}$  для данного конкретного столкновения (определяется начальными условиями).

$$\mathbf{J} = \mathbf{r} \times \mathbf{p},$$

$$J_{x1} = y_1 p_{z1} - z_1 p_{y1}, \quad J_{y1} = z_1 p_{x1} - x_1 p_{z1},$$

$$J_{z1} = x_1 p_{y1} - y_1 p_{z1},$$

$$J_{x2} = y_2 p_{z2} - z_2 p_{y2}, \quad J_{y2} = z_2 p_{x2} - x_2 p_{z2},$$

$$J_{z2} = x_2 p_{y2} - y_2 p_{z2},$$

$$A_1 = J_{x1} \sin \varphi - J_{z1} \cos \varphi, \quad B_1 = J_{x1} \cos \varphi + J_{z1} \sin \varphi,$$

$$A_2 = J_{x2} \sin \varphi - J_{z2} \cos \varphi, \quad B_2 = J_{x2} \cos \varphi + J_{z2} \sin \varphi,$$

$$J_y = J_{y1} + J_{y2}, \quad A = A_1 + A_2, \quad B = B_1 + B_2.$$

## Список литературы

- [1] Г. Герцберг. *Колебательные и вращательные спектры многоатомных молекул* (Иностранная Литература, Москва, 1949). Herzberg G. *Molecular Spectra and Molecular Structure. II. Infrared and Raman Spectra of Polyatomic Molecules* (Van Nostrand, Princeton, 1945).
- [2] K. Noll, R. Knacke, A. Tokunaga, J. Lacy, S. Beck, E. Serabyn. *Icarus*, **65** (2–3), 257–263 (1986). DOI: 10.1016/0019-1035(86)90138-7
- [3] A. Coustenis, Th. Encrenaz, B. Bezard, G. Björaker, G. Graner, M. Dang-Nhu, E. Arie. *Icarus*, **102**, 240–260 (1993). DOI: 10.1006/icar.1993.1047
- [4] M. Metsälä, F.M. Schmidt, M. Skyttä, O. Vaittinen, L. Halonen. *J. Breath Res.*, **4** (4), 046003, 1–8 (2010). DOI: 10.1088/1752-7155/4/4/046003
- [5] M. Frenklach. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **4** (11), 2028–2037 (2002). DOI: 10.1039/b110045a
- [6] Z.R. Quine, K.L. McNesby. *Appl. Opt.*, **48** (16), 3075–3083 (2009). DOI: 10.1364/ao.48.003075
- [7] J. Buldyreva, N. Lavrentieva, V. Starikov. *Collisional line broadening and shifting of atmospheric gases: A practical guide for line shape modeling by current semiclassical approaches* (Imperial College Press, 2011).
- [8] J.-P. Bouanich, D. Lambot, G. Blanquet, J. Walrand. *J. Mol. Spectrosc.*, **140** (2), 195–213 (1990). DOI: 10.1016/0022-2852(90)90134-C
- [9] A.S. Pine. *JQSRT*, **50** (2), 149–166 (1993). DOI: 10.1016/0022-4073(93)90114-W
- [10] J.-P. Bouanich, G. Blanquet, J.-C. Populaire, J. Walrand. *J. Mol. Spectrosc.*, **190** (1), 7–14 (1998). DOI: 10.1006/jmsp.1998.7559
- [11] A. Babay, M. Ibrahim, V. Lemaire, B. Lemoine, F. Rohart, J.-P. Bouanich. *JQSRT*, **59** (3–5), 195–202 (1998). DOI: 10.1016/S0022-4073(97)00122-2
- [12] S.W. Arteaga, C.M. Bejger, J.L. Gerecke, J.L. Hardwick, Z.T. Martin, J. Mayo et al. *J. Mol. Spectrosc.*, **243**, 253–266 (2007). DOI: 10.1016/j.jmsp.2007.04.007
- [13] M. Dhyne, L. Fissiaux, J.C. Populaire, M. Lepére. *JQSRT*, **110**, 358–366 (2009). DOI: 10.1016/j.jqsrt.2008.12.009
- [14] M. Dhyne, P. Joubert, J.-C. Populaire, M. Lepére. *JQSRT*, **111** (7–8), 973–989 (2010). DOI: 10.1016/j.jqsrt.2009.12.004
- [15] H. Rozario, J. Garber, C. Povey, D. Hurtmans, J. Buldyreva, A. Predoi-Cross. *Mol. Phys.*, **110** (21–22), 2645–2663 (2012). DOI: 10.1080/00268976.2012.720040
- [16] C. Povey, M. Guilloré-Obregon, A. Predoi-Cross, S.V. Ivanov, O.G. Buzykin, F. Thibault. *Can. J. Phys.*, **91**, 896–905 (2013). DOI: 10.1139/cjp-2013-0031
- [17] J. Buldyreva, S.V. Ivanov, L. Nguyen. *J. Raman Spectrosc.*, **36**, 148–152 (2005). DOI: 10.1002/jrs.1283
- [18] S.V. Ivanov, L. Nguyen, J. Buldyreva. *J. Mol. Spectrosc.*, **233**, 60–67 (2005). DOI: 10.1016/j.jmsp.2005.05.014
- [19] L. Nguyen, S.V. Ivanov, O.G. Buzykin, J. Buldyreva. *J. Mol. Spectrosc.*, **239**, 101–107 (2006). DOI: 10.1016/j.jmsp.2006.05.020
- [20] S.V. Ivanov, O.G. Buzykin. *JQSRT*, **111**, 2341–2353 (2010). DOI: 10.1016/j.jqsrt.2010.04.031
- [21] F. Thibault, S.V. Ivanov, O.G. Buzykin, L. Gomez, M. Dhyne, P. Joubert, M. Lepére. *JQSRT*, **112**, 1429–1437 (2011). DOI: 10.1016/j.jqsrt.2011.02.011
- [22] F. Thibault, R.Z. Martínez, D. Bermejo, S.V. Ivanov, O.G. Buzykin, Q. Ma. *JQSRT*, **142**, 17–24 (2014). DOI: 10.1016/j.jqsrt.2014.03.009

- [23] J. Buldyreva, L. Nguyen. *Mol. Phys.*, **102**, 1523–1535 (2004). DOI: 10.1080/00268970410001725837
- [24] D. Lambot, A. Olivier, G. Blanquet, J. Walrand, J.-P. Bouanich. *JQSRT*, **45**(3), 145–155 (1991). DOI: 10.1016/0022-4073(91)90004-A
- [25] D. Lambot, J.C. Populaire, J. Walrand, G. Blanquet, J.P. Bouanich. *J. Mol. Spectrosc.*, **165**, 1–11 (1994). DOI: 10.1006/jmsp.1994.1107
- [26] D. Jacquemart, J.-Y. Mandin, V. Dana, L. Régalia-Jarlot, X. Thomas, P. Von der Heyden. *JQSRT*, **75**(4), 397–422 (2002). DOI: 10.1016/S0022-4073(02)00017-1
- [27] M. Lepére, G. Blanquet, J. Walrand, J.-P. Bouanich, M. Herman, J. Van der Auwera. *J. Mol. Spectrosc.*, **242**(1), 25–30 (2007). DOI: 10.1016/j.jms.2007.01.004
- [28] Sajid Muhammad Bilal, Es-sebbar E-touhami, Farooq Aamir. *JQSRT*, **148**, 1–12 (2014). DOI: 10.1016/j.jqsrt.2014.06.014
- [29] A.S. Pine, J.P. Looney. *J. Chem. Phys.*, **93**, 6942–6953 (1990). DOI: 10.1063/1.459471
- [30] F. Herregodts, D. Hurtmans, J. Van der Auwera, M. Herman. *J. Chem. Phys.*, **111**, 7954–7960 (1999). DOI: 10.1063/1.480129
- [31] H. Valipour, D. Zimmermann. *J. Chem. Phys.*, **114**(8), 3535–3545 (2001). DOI: 10.1063/1.1333022
- [32] A. Lucchesini, M. de Rosa, D. Pelliccia, C. Gabbanini, S. Gozzini. *Appl. Phys. B*, **63**, 277–282 (1996). DOI: 10.1007/BF01833797
- [33] C. Yelleswarapu, A. Sharma. *JQSRT*, **69**(2), 151–158 (2001). DOI: 10.1016/S0022-4073(00)00073-X
- [34] P. Varanasi, R.P. Bangaru. *JQSRT*, **15**, 267–273 (1975). DOI: 10.1016/0022-4073(75)90149-1
- [35] J.S. Wong. *J. Mol. Spectrosc.*, **82**, 449–451 (1980). DOI: 10.1016/0022-2852(80)90128-9
- [36] C.P. McRaven, M.J. Cich, G.V. Lopez, T.J. Sears, D. Hurtmans, A.W. Mantz. *J. Mol. Spectrosc.*, **266**(1), 43–51 (2011). DOI: 10.1016/j.jms.2011.02.016
- [37] J.S. Li, G. Durry, J. Cousin, L. Joly, B. Parvitte, V. Zeninari. *JQSRT*, **111**(15), 2332–2340 (2010). DOI: 10.1016/j.jqsrt.2010.04.025
- [38] A.I. Nadezhinskii, Ya.Ya. Ponurovskii. *Spectrochim. Acta A*, **66**, 807–810 (2007). DOI: 10.1016/j.saa.2006.10.040
- [39] K.K. Lehmann. *J. Chem. Phys.*, **146**, 094309 (2017). DOI: 10.1063/1.4977726
- [40] W.C. Swann, S.L. Gilbert. *JOSA B*, **17**(7), 1263–1270 (2000). DOI: 10.1364/JOSAB.17.001263
- [41] E.C. Gross, K.A. Tsang, T.J. Sears. *J. Chem. Phys.*, **154**, 054305-1–054305-9 (2021). DOI: 10.1063/5.0036602
- [42] M.J. Cich, C.P. McRaven, G.V. Lopez, T.J. Sears, D. Hurtmans, A.W. Mantz. *Appl. Phys. B*, **109**, 373–384 (2012). DOI: 10.1007/s00340-011-4829-0
- [43] S.J. Cassady, W.Y. Peng, R.K. Hanson. *JQSRT*, **221**, 172–182 (2018). DOI: 10.1016/j.jqsrt.2018.09.031
- [44] R. Georges, D. van der Vorst, M. Herman, D. Hurtmans. *J. Mol. Spectrosc.*, **185**(1), 187–188 (1997). DOI: 10.1006/jmsp.1997.7372
- [45] C. Povey, A. Predoi-Cross, D.R. Hurtmans. *J. Mol. Spectrosc.*, **268**, 177–188 (2011). DOI: 10.1016/j.jms.2011.04.020
- [46] J.-P. Bouanich, A. Predoi-Cross. *Mol. Phys.*, **109**(17–18), 2071–2081 (2011). DOI: 10.1080/00268976.2011.599342
- [47] Ayan kumar Pal, Naveen Kumar, R.J. Kshirsagar. *JQSRT*, **300**, 108510 (2023). DOI: 10.1016/j.jqsrt.2023.108510
- [48] S.V. Ivanov, O.G. Buzykin. *Mol. Phys.*, **106**, 1291–1302 (2008). DOI: 10.1080/00268970802270034
- [49] Г. Голдстейн. *Классическая механика* (ГИТГЛ, М., 1957).
- [50] R.G. Gordon. *J. Chem. Phys.*, **44**(8), 3083–3089 (1966). DOI: 10.1063/1.1727183
- [51] R.G. Gordon. *J. Chem. Phys.*, **45**(5), 1649–1655 (1966). DOI: 10.1063/1.1727808
- [52] S.V. Ivanov, O.G. Buzykin. *JQSRT*, **119**, 84–94 (2013). DOI: 10.1016/j.jqsrt.2012.12.021
- [53] Дж. Гиршфельдер, Ч. Кертисс, Р. Берд. *Молекулярная теория газов и жидкостей* (Иностранная литература, М., 1961).
- [54] I.R. Dagg, A. Anderson, W. Smith, M. Missio, C.G. Joslin, L.A.A. Read. *Can. J. Phys.*, **66**(5), 453–459 (1988). DOI: 10.1139/p88-074
- [55] R.E. Langer. *Phys. Rev.*, **51**, 669–676 (1937). DOI: 10.1103/PhysRev.51.669
- [56] S. Chapman, S. Green. *J. Chem. Phys.*, **67**(5), 2317–2331 (1977). DOI: 10.1063/1.435067
- [57] S.V. Ivanov, O.G. Buzykin. *JQSRT*, **185**, 48–57 (2016). DOI: 10.1016/j.jqsrt.2016.08.017
- [58] C.W. Gear. *Numerical Initial Value Problems in Ordinary Differential Equations* (Englewood Cliffs, Prentice-Hall, N.J., 1971).
- [59] S.V. Ivanov. *JQSRT*, **177**, 269–282 (2016). DOI: 10.1016/j.jqsrt.2016.01.034
- [60] C.G. Gray, K.E. Gubbins. *Theory of Molecular Fluids* (Oxford University Press, N.Y., 1984).
- [61] J.M. Junquera-Hernandez, J. Sanchez-Marin, D. Maynau. *Chem. Phys. Lett.*, **359**, 343–348 (2002). DOI: 10.1016/S0009-2614(02)00722-4
- [62] S. Coriani, C. Hättig, P. Jorgensen, A. Rizzo, K. Ruud. *J. Chem. Phys.*, **109**, 7176–7184 (1998). DOI: 10.1063/1.477399
- [63] A. Halkier, S. Coriani. *Chem. Phys. Lett.*, **303**, 408–412 (1999). DOI: 10.1016/S0009-2614(99)00269-9
- [64] R.D. Amos, J.H. Williams. *Chem. Phys. Lett.*, **66**(3), 471–474 (1979). DOI: 10.1016/0009-614(79)80319-X