

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 621.373.8

DOI: 10.17223/00213411/64/4/150

О.К. ВОЙЦЕХОВСКАЯ¹, О.В. ШЕФЕР²**ВЛИЯНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ ШИРИНЫ ЛИНИЙ СО₂-ЛАЗЕРА НА ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ГАЗОВ НА ПРИМЕРЕ АММИАКА**

Проанализировано влияние параметров излучения СО₂-лазера (ширина и контур лазерных линий) на основном изотопе молекулы на величину коэффициента поглощения газообразного соединения на примере аммиака. Рассмотрены результаты применения СО₂-лазера для определения содержания газообразного аммиака и проанализированы возможные ошибки определения концентрации газа при пренебрежении конкретной спектральной шириной линии излучения СО₂-лазера.

Ключевые слова: СО₂-лазер, ширина линии, аммиак, атмосфера, газоанализ, излучение, поглощение, пропускание.

Введение

Для определения концентрации газов применяемые методы основываются на известном законе Бэра и численное значение коэффициента поглощения (КП) на единицу концентрации (независимо от размерности назовем его абсолютным) является важнейшей величиной, точность которой прямо пропорциональна точности итогового значения содержания изучаемого газообразного соединения.

В решении этой задачи широко применяются методы, основанные на абсорбционной спектроскопии сред с использованием лазерного излучения. Для дистанционного зондирования газовых смесей (включая атмосферу) традиционным является метод дифференциального поглощения (МДП) [1], основанный на измерении ослабления проходящего излучения средой на двух близко расположенных линиях излучения лазера с максимальным (КП_{он}) и минимальным (КП_{от}) коэффициентами поглощения зондируемого газа. Преимущество метода заключается в обработке разности величин ослабления излучения лазера на выбранных длинах волн, что нивелирует возможные фоновые эффекты. В случае локальных трасс (включая лабораторные кюветы), применяется обработка значения пропускания среды для вычисления концентрации ρ газа непосредственно с опорой на абсолютное значение КП. Напомним, что в упрощенном варианте

$$\rho = \ln(T_v) / (-k_v l),$$

где T_v – пропускание; k_v – абсолютный КП; l – длина трассы.

Выбор перспективных лазерных линий для контроля за содержанием конкретного газообразного соединения проводится по последовательной схеме и предварительно выполняются определенные этапы работы:

1. Анализ достоверности используемой спектроскопической информации по параметрам спектральных линий (ПСЛ) поглощения зондируемого газа в спектральном районе излучения лазера. Учитывая, что в настоящее время существует значительное число баз данных по параметрам спектральных линий поглощения газов, проводится сравнение с известным экспериментом (из литературы) рассчитанных коэффициентов поглощения по разным базам ПСЛ и выбираются наиболее точные значения ПСЛ.

2. Валидация значений центров линий излучения лазера.

3. Расчет распространения лазерного излучения с моделью среды, близкой к изучаемой. При этом расчет проводится с учетом выходных параметров лазерного излучения (спектральный контур, центр и ширина лазерной линии).

В предлагаемой работе эти этапы выполнены для лазера на основном изотопе углекислого газа и зондируемого газа на примере аммиака, который выбран по следующим причинам. Это один из самых ядовитых газов в атмосфере, который является очень распространенным побочным продуктом промышленной и сельскохозяйственной деятельности. Аммиак катализирует атмосферное окисление диоксида серы до триоксида серы и реагирует с кислотными компонентами атмосферы (серной, азотной и соляной кислотами). Образующиеся соли аммония являются основными ком-

понентами аэрозолей смога и влияют на радиационный баланс Земли. Поглощение этим газом в спектральной области генерации (9–11 мкм) значительно по величине и имеется возможность качественного определения содержания контролируемого газа (NH₃) с помощью CO₂-лазера.

Характеристики излучения CO₂-лазера

Преимущества CO₂-лазера обосновывают его широкое применение (имеющее более полувековую историю) в решении разнообразных научных и прикладных задач [1–4]. Одновременная генерация излучения на колебательно-вращательных переходах молекулы CO₂ позволяет изучать мультикомпонентные газовые смеси. Целый цикл работ по выявлению заболеваний по анализу содержания аммиака и других соединений в выдохе пациентов на основе поглощения излучения CO₂-лазера проведен в [5–7]. CO₂-лазерный фотоакустический спектрометр для измерения этилена, ацетона и аммиака в дыхании пациентов с почечной недостаточностью описан в [5] и показано, что концентрация аммиака в выдохе у больных превышает норму в несколько раз. Однако вопросы погрешности результатов не обсуждались.

Многочисленные работы по дистанционному анализу газового и аэрозольного состава вулканических выбросов с помощью CO₂-лазера отражают необходимость таких исследований для прогноза вулканических извержений и землетрясений [8–10]. В целом же наибольшее применение CO₂-лазер находит в газоанализе атмосферы Земли [11–15]. Оригинальным приложением CO₂-лазера отличается работа [16], в которой предложено контролировать численность птичьих гнездовий в Арктике измерением концентрации аммиака в воздухе, так как значительный вклад в загрязнение арктической атмосферы вносят птичьи базары, содержание аммиака над которыми превышает с обычной концентрации (40–870)·10⁻⁶ до 10⁻² ppm [16].

В настоящий момент значения многих центров линий излучения CO₂-лазера определены с точностью до 10⁻⁴ см⁻¹ [17–19]. Например, для данных [17, 18] расхождения в значениях центров линий переходов P(40)÷R(40), принадлежащих двум основным излучательным полосам CO₂-лазера, наблюдаются только в пятом знаке после запятой (в единицах см⁻¹). Некоторые отличия имеются с данными [19], что естественно для более ранней работы. Однако нельзя пренебрегать возможной нестабильностью центра линии излучения лазера. Нестабилизованный лазер подвержен различным эффектам, вызывающим изменение длины волны излучения. В частности, длина резонатора влияет на частоту излучения и поэтому схемы стабилизации сводятся к поддержанию его постоянной длины. Тепловые реакции материалов компонент установки, изменения атмосферных условий, механические вибрации, изменения в положении оптических компонентов, шумы также приводят к изменению длины волны излучения лазера [20].

Ширина и контур линии излучения, распространяющегося в газовой среде, могут быть определяющими факторами, влияющими на точность итогового значения концентрации газа. При совпадении центров линий излучения лазера и поглощения контролируемого газа величина КП зависит от ширины лазерной линии (ЛЛ) [21]. При расчете КП газа на лазерной линии происходит свертка контуров спектральных линий поглощения газа и излучения лазера, причем последний играет роль некой аппаратной функции. Именно поэтому и наблюдается зависимость КП газа от ширины ЛЛ. Факторы, приводящие к уширению линий генерации лазера, можно разделить на две группы: физические и технологические. К первой группе относятся однородные естественные и столкновительные механизмы уширения, а также неоднородное уширение, обусловленное эффектом Доплера. Ширина линии усиления в активной среде относится к внутренним параметрам CO₂-лазера. Тепловые флуктуации элементов лазерной системы (например, держателей зеркал) и неоднородность показателя преломления среды связаны с технологическими факторами, изменяющими внешние параметры CO₂-лазера – характеристики выходящего излучения [22, 23].

В литературе приводятся различные значения ширины лазерных линий. При полном общем давлении рабочей смеси 15 мм рт. ст. ширина составляет ≈ 43 МГц. Но при больших давлениях ширина линии излучения CO₂-лазера (Δν) может плавно варьировать в интервале 250–650 МГц (в районе 10 мкм Δν принимает значения от 0.0083 до 0.0216 см⁻¹) при соответствующем изменении мощности 250–400 мДж. Например, в [24] ширина линии излучения перехода P20 полосы (00⁰1–10⁰0) составила 250 МГц при мощности излучения 250 мДж.

В [25] применена особая технология измерения спектральной ширины импульсного лазера и получена величина (0.013±0.002) см⁻¹, которая совпадает с модельными расчетами в этой работе. При близком (менее 0.001 см⁻¹) совмещении центра лазерной линии с центром линии поглощения

газа увеличение ширины лазерной линии вызывает уменьшение поглощения, а при попадании линии излучения лазера на ближнее крыло линии газа поглощение может увеличиваться. Ниже приводятся результаты расчетов КП аммиака для разных значений ширины ЛЛ. Но дополнительной проблемой является выбор контура линии излучения CO_2 -лазера. При общем давлении рабочей смеси ниже 100 мм рт. ст. можно использовать контур Гаусса, при больших давлениях генерируются несколько продольных мод и форма контура не столь очевидна. В наших расчетах мы предполагаем, что контур ЛЛ имеет гауссовскую форму согласно [3].

Пример возможных значений внешних параметров лазера приведен в [26]. Условия эксперимента в [26] следующие: длительность лазерного импульса по полувысоте составляла 150 нс, а энергия в пучке сечением 3.5×0.8 см достигала 0.5 Дж. Давление рабочей смеси в CO_2 -лазере было 3 атм ($\text{CO}_2:\text{N}_2 = 1:2$). При этих условиях ширина отдельной колебательно-вращательной линии усиления CO_2 -лазера, согласно [26], составляет 0.5 см^{-1} .

Вопрос о ширине лазерной линии CO_2 -лазера непрерывного режима обсуждался в [27], где указана ширина одной моды, приблизительно равная 75 МГц. Зависимость ширины линии излучения CO_2 -лазера от давления рабочей смеси ярко проиллюстрирована в [28]. Записывались спектры излучения при двух давлениях смеси 1 и 10 атм и между ними наблюдалось принципиальное отличие. В первом варианте имеем совокупность разрешенных линий, во втором – широкополосное излучение с небольшими пиками по общему контуру.

Таким образом, в многомодовом режиме ширина ЛЛ может значительно варьировать и возможный интервал вариаций достаточно велик.

Точность значений параметров спектральных линий

Оценка достоверности значений поглощения контролируемых газов всегда опирается на эксперимент по спектральным характеристикам молекулярного поглощения. В настоящее время расчет последних выполняется line by line методом и точность результата расчета определяется погрешностями параметров спектральных линий поглощающего газа. Наиболее очевидный способ валидации ПСЛ – это расчет КП с использованием ПСЛ из базы данных (БД) и последующее сравнение с экспериментом. Но поскольку задача многопараметрическая, существует свобода в задании численных значений границ учета вкладов соседних линий, выбора в использовании конкретной БД по ПСЛ, в модели контура и значений ширины лазерной линии. Это объясняет расхождения в результатах расчетов разных авторов.

Базы данных параметров спектральных линий «NITRAN» [29, 30] и «GEISA» [31] наиболее популярны при моделировании спектральных характеристик атмосферных и примесных газов. Отличаясь хорошо организованным программным обеспечением, данные по ПСЛ, содержащиеся в них, широко используются в прикладных расчетах. Например, в [32] вычисления сечений поглощения 15 молекул на длинах волн CO_2 -лазера и его изотопов осуществлены с использованием базы данных «GEISA». Дальнейшее развитие спектроскопических исследований стимулировало разработку в мире аналогичных БД с различными подходами к формированию архитектуры БД и их физическому наполнению.

Общая ситуация по точности расчетов ПСЛ характеризуется наименьшей погрешностью для ПСЛ вероятностей переходов фундаментальных полос поглощения газов ($\approx 1\text{--}5\%$) и возрастанием ошибки для переходов между высоковозбужденными состояниями. Энергетическая структура для упомянутых полос в настоящее время определена с высокой точностью ($\approx 10^{-4} \text{ см}^{-1}$). В [30] для ПСЛ каждой линии поглощения в строке записи указывается погрешность.

Анализ коэффициентов поглощения излучения CO_2 -лазера аммиаком

Рассмотрим имеющиеся в литературе описания экспериментов по значениям КП аммиака на длинах волн CO_2 -лазера. Подборка данных по коэффициентам поглощения NH_3 в работах до 1991 г. выполнена в [33]. Большие отличия экспериментальных значений КП для одних и тех же условий требуют объяснения. Анализ расхождений в экспериментальных значениях КП для ряда газов позволил предположить, что причина этого кроется в различных значениях ширины лазерной линии в конкретных экспериментах, что подтвердил расчет соответствующих зависимостей [21]. Показано, что усреднять значения КП, измеренные разными авторами, нельзя, так как одна из причин расхождения – различия в спектральной ширине лазерного излучения.

Тщательное экспериментальное исследование поглощения аммиаком излучения CO₂-лазера выполнено в [34]. Авторы [34] рабочую смесь применяли при малом давлении (34 мб) и поэтому профиль линии излучения можно считать гауссовским. Были созданы два режима генерации с высокой и низкой мощностью. Большое внимание уделено минимизации погрешностей при измерении ослабления излучения CO₂-лазера, но авторы справедливо отметили неизбежность возможных трудно оцениваемых ошибок. Данные из [34] приведены в табл. 1 с указанием погрешности измерений каждого значения КП.

Таблица 1

Коэффициенты поглощения аммиака NH₃

Идентификация лазерного перехода	Центр лазерной линии, см ⁻¹	Эксперимент, см ⁻¹ ·атм ⁻¹ КП±ΔКП [34]	Ширина лазерной линии, см ⁻¹		
			0.004	0.01	0.1
9R(16)	1075.98782	11.29±0.158 (1.4%)	14.78	14.80	13.30
9P(20)	1046.85423	2.10±0.042 (2%)	2.42	2.95	3.16
9P(34)	1033.48800	3.99±0.0247 (0.62%)	3.67	3.67	4.50
10R(14)	971.93026	6.17±0.0925 (1.5%)	7.28	7.08	6.29
10R(8)	967.70723	20.08±0.261 (1.3%)	22.79	22.76	20.76
10R(6)	966.25036	26.2±0.442 (1.7%)	28.54	28.53	27.77
10P(32)	932.96042	12.45±0.0361 (2.9%)	15.66	15.64	13.99
10P(34)	931.00143	14.0±0.0672 (0.48%)	15.11	15.13	17.73
10P(36)	929.01744	7.39±0.061 (0.83%)	8.97	8.99	10.58
9R30	1084.63514	73.0±5.2 (7.12%) [22]	71.422	71.105	53.206
9R28	1083.47878		0.436	0.436	0.441

Результаты наших расчетов значений КП для трех значений ширины ЛЛ приведены в табл. 1. Значение 0.004 см⁻¹ заявлено в [34], 0.01 см⁻¹ близко к измеренной в [25], 0.1 см⁻¹ измерено в [35]. Отметим, что все расчеты проводились с использованием программного комплекса TRAVA [36] с подключением базы данных «NITRAN2016» [16] line by line методом [37], при этом использовался контур Гаусса, температура NH₃ 296 К.

Данные табл. 1 отражают все трудности определения точного значения КП для вычисления реальной концентрации газа. Дело в том, что авторы [34] принимали за абсолютное значение КП экспериментальные данные [38], которые для линии 9R30 при стандартных условиях определили значение КП = 57.12 см⁻¹·атм⁻¹. Как видно из табл. 1, это значение соответствует ширине ЛЛ порядка 0.1 см⁻¹, хотя в своем эксперименте авторы [34] рабочую смесь CO₂-лазера формировали при малых давлениях (15 мм рт. ст.) и принимали ширину ЛЛ, равную 119 МГц ≈ 0.004 см⁻¹, что позволило им рассматривать режим генерации как одномодовый. Но тогда коэффициент поглощения должен быть равным ≈ 70 см⁻¹·атм⁻¹, согласно эксперименту [39] и нашему расчету. Но в работе [35] для той же линии указывается значение 60 атм⁻¹·см⁻¹, которое по нашим расчетам соответствует ширине лазерной линии 0.065 см⁻¹. Поэтому ошибка в определении концентрации в [34] может составить от 12 до 8% только за счет неточности абсолютного значения КП.

С другой стороны, например, для линии 9P20 измерение может происходить на длине волны 1046.896 см⁻¹, на которой КП NH₃ соответствует экспериментальному значению КП = 2.1 см⁻¹·атм⁻¹. Расхождение по центрам составляет всего 0.042 см⁻¹ и можно предположить, что линия CO₂-лазера перестроилась при измерении КП на этой линии. Также не исключены погрешности в значениях ПСЛ в БД «NITRAN 2016» [29]. Таким образом, однозначно указать причину расхождения для некоторых случаев затруднительно. Наш детальный разбор экспериментальных значений КП газа, показал, что информация о количественных значениях КП должна тщательно проверяться с использованием как теоретических, так и экспериментальных данных.

Температурная зависимость КП излучения CO₂-лазера аммиаком для определения концентрации методом дифференциального поглощения

Наибольшее влияние на интенсивность проходящего в среде излучения оказывают молекулярное поглощение и аэрозольное ослабление. Принцип МДП позволяет исключить влияние аэрозолей на величину измеряемого КП газообразного соединения.

Выбор пар линий, пригодных для работы МДП по определению концентрации аммиака с помощью CO_2 -лазера в литературе обсуждался неоднократно, наиболее детальное рассмотрение проведено в [40] и предложены четыре рабочие пары линий CO_2 -лазера, оптимальные для зондирования NH_3 в атмосфере. Каждая пара рекомендована для различных уровней концентраций NH_3 , примерно от нескольких ppbV до ppmV в загрязненной атмосфере. Проведены расчеты КП NH_3 с использованием базы данных «HITRAN96» и отмечено хорошее согласие, в основном в пределах $\pm 10\%$, с другими экспериментальными результатами. Утверждается, что значения КП аммиака незначительно зависят от температуры и давления окружающей среды. Однако для проверки последнего для этих пар линий нами проведен расчет КП для температур, характерных для Арктики, и оценено влияние температуры среды на соотношение $\text{КП}_{\text{он}} - \text{КП}_{\text{офф}}$.

Факт влияния температуры среды на величину ослабления проходящего излучения известен и при расчетах КП учитываются температурные зависимости полуширин и интенсивностей линий поглощения зондируемых газов [26]. В теоретическом плане зависимость столкновительной полуширины линии поглощения γ от давления имеет сложный характер и в расчетах для перевода значений от одних термодинамических условий (P_0, T_0) к другим (P, T) применяется формула

$$\gamma_{\text{gas}}(P, T) = \gamma_{\text{gas}}(P_0, T_0) (T_0/T)^n (P/P_0).$$

В [40] использовались упрощенные температурные зависимости параметров спектральных линий поглощения NH_3 и показатель степени был равен постоянному значению $n = 0.75$, что и привело их к выводу о возможности пренебрежения температурной зависимостью КП NH_3 для разных температур. На самом деле значения показателя n для газа в воздухе различны для линий поглощения, образованных переходами с уровней с разными квантовыми числами, что и учитывалось в наших расчетах. В современных БД по ПСЛ указывается температурный коэффициент перевода значений полуширины каждой линии от одной температуры к другой. Перевод полуширины для низких температур требует осторожности, так как занесенные в БД ПСЛ-значения определяются для ограниченного диапазона условий среды и неизвестно, как поведет себя значение переводного показателя ширины ЛЛ при условиях вне изученного диапазона. Нами проведен расчет соотношений $\text{КП}_{\text{он}}$ и $\text{КП}_{\text{офф}}$ для четырех вероятных температур в Арктике (табл. 2). Условия расчета: ширина лазерных линий – 0.01 см^{-1} , контур линии излучения – Гаусс, контур линии поглощения аммиака – Лоренц. В процентах приведено значение соотношения ($\text{КП 233} - \text{КП 293}$) / КП 293 .

Таблица 2

**Изменение коэффициентов поглощения NH_3 ($\text{см}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$) при разных температурах
(диапазон арктических температур)**

Идентификация лазерного перехода	Центр, см^{-1}	Температура атмосферы, К				(КП 233 – КП 293) / / КП 293
		293	273	253	233	
9R30	1084.63514	71.607	74.804	77.613	79.796	
9R28	1083.47878	0.445	0.506	0.575	0.655	
$\text{КП}_{\text{он}} - \text{КП}_{\text{офф}} = 11.2\%$		71,162	74,298	77,038	79,141	11.2%
10R14	971.93026	7.446	8.582	9.960	11.656	
10R18	974.62194	0.062	0.073	0.086	0.105	
$\text{КП}_{\text{он}} - \text{КП}_{\text{офф}} = 64.3\%$		7.384	8.509	9.874	11.551	64.3%
10R8	967.70723	23.232	26.840	31.246	36.697	
10R10	969.13955	0.612	0.736	0.896	0.105	
$\text{КП}_{\text{он}} - \text{КП}_{\text{офф}} = 61.7\%$		22.620	26.104	30.350	36.592	61.7%
10P32	932.96042	15.813	16,975	18,178	19,402	
10P30	934.89450	0.944	1.021	1.105	1.199	
$\text{КП}_{\text{он}} - \text{КП}_{\text{офф}} = 26\%$		14.869	15.954	17.073	18.203	26%

Как видно из табл. 2, пренебрежение точным значением температуры среды может привести к значительным погрешностям в определении концентрации NH_3 , так как разность КП для низких температур может меняться более чем на 50%. Но для главной пары линий CO_2 -лазера 9R30–9R28 диапазон изменения КП наименьший для выбранных температур.

Заключение

Рассмотрено применение CO₂-лазера для контроля за содержанием аммиака в газовых смесях на основе спектроскопической информации по коэффициентам поглощения аммиака на линиях лазерного излучения. Объяснены расхождения в значениях коэффициента поглощения в различных экспериментах. Показано, что хотя на регистрируемую фотоприемником мощность излучения значение ширины лазерной линии не влияет, но при интерпретации этих результатов для определения концентрации газа использоваться должно значение КП, соответствующее условиям реального эксперимента и характеристикам используемого CO₂-лазера, что обеспечит наименьшую погрешность концентрации. Для этого необходимо контролировать центр и ширину лазерной линии, в частности, возможно использование методов абсорбционной спектроскопии для измерения этих характеристик [41].

Подчеркнута необходимость корректного учета температурной зависимости коэффициента поглощения среды и приведена количественная оценка погрешности данных, рассчитанных при стандартной температуре (≈ 296 К) вместо фактической.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хинкли Э.Д. Лазерный мониторинг атмосферы. – М.: Мир, 1976. – 412 с.
2. Measures R.M. Laser Remote Sensing, Fundamentals and Applications. – Krieger Publishing Co. Malabar, FL, 1992. – 550 p.
3. Kullinger D.K. and Mooradian A. Optical and Laser Remote Sensing. – N.Y.: Springer Verlag, 1983. – 326 p.
4. Switch M.L. Waveguide Gas Lasers (in Laser Handbook). – Amsterdam: P.O. Box 103. North Holland Physics Publishing, 1986. – P. 41–88.
5. Mitrayana, Nikita J.G., Wasono M.A.J., and Satriawan M. // Sensing and Bio-Sensing Research. – 2020. – V. 30. – P. 100387. <https://doi.org/10.1016/j.sbsr.2020.100387>.
6. Dumitras D.C. et al. // Laser Phys. – 2011. – V. 21. – P. 796–800. <https://doi.org/10.1134/S1054660X11070061>.
7. Essiet I. // J. Emerg. Trends Eng. Appl. Sci. – 2013. – V. 4. – P. 859–862.
8. QueiBer D.A., Burton M., and Fiorani L. // Opt. Express. – 2015. – V. 23. – P. 6634–6644. <https://doi.org/10.1364/OE.23.006634>.
9. Fiorani L., Colao F., and Palucci F. // Opt. Lett. – 2009. – V. 34. – P. 800–802.
10. Aiuppa A., Fiorani L., Santoro S., et al. // Sci. Rep. – 2015. – V. 5. – P. 13614. <https://doi.org/10.1038/srep13614>.
11. Harren F.J.M., Mandon J., and Cristescu S.M. Photoacoustic Spectroscopy in Trace Gas Monitoring. – Encyclopedia of Analytical Chemistry. John Wiley & Sons. Ltd., 2012. <http://doi.org/10.1002/9780470027318.a0718.pub2>.
12. Лазерное зондирование атмосферы / ред. В.Е. Зуев. – М.: Наука, 1976. – 154 с.
13. Fujii T. and Fukuchi T. Laser Remote Sensing. – Tokyo: Taylor & Francis Group, 2005. – 923 p.
14. Gaudio P., Gelfusal M., Malizial A., et al. // J. Phys.: Conf. Ser. – 2015. – V. 658. – P. 012004.
15. Pal A., Clark C.D., Sigman M., and Killinger D.K. // J. Appl. Opt. – 2009. – V. 48. – P. B145–B150. <https://doi.org/10.1364/AO.48.00B145>.
16. Graft B., Wentworth G.R., Martin R.V., et al. // Nature Commun. – 2016. – V. 15. – P. 13444. DOI: 10.1038/ncomms13444/
17. Amy-Klein A., Vigue' H., and Chardonnet C.J. // Mol. Spectrosc. – 2004. – V. 228. – P. 206–212.
18. Freed C., Bradley L.S., and O'Donnell R.G. // IEEE J. Quantum Electron. – 1980. – V. 16. – P. 1195–1206.
19. Beck R., Englisch W., and Gurs K. Table of Laser Lines in Gases and Vapors. – Springer Series in Optical Sciences, 1978. – 203 p.
20. <http://www.slab-laser.ru/CO2-lasers.html>
21. Voitsekhovskaya O.K., Aksenova E.N., and Shatrov F.G. // J. Appl. Opt. – 1999. – V. 38. – P. 2337–2341.
22. Хирд Г. Измерение лазерных параметров: пер. с англ. – М.: Мир, 1970. – 540 с.
23. Svelto O. Principles of Lasers. – Third edition. – New York; London: Plenum Press, 1984. – 550 p.
24. Duarte F.J. // J. Appl. Opt. – 1985. – V. 24. – P. 34–37.
25. Kunents A.V., Makarov G.N., Mironenko V.R., and Pak I. // Opt. Commun. – 1991. – V. 84. – P. 37–41.
26. Горохов Ю.А., Ефимов С.В., Князев И.Н., Лобко В.В. // Квантовая электроника. – 1979. – Т. 6. – P. 2382–2392.
27. Al-Hawat S., Saloum S., and Zidan M.D. // Appl. Phys. B. – 2004. – V. 78. – P. 439–442. DOI: 10.1007/s00340-003-1376-3.
28. Kimura W.D. // Opt. Laser Technol. – 2017. – V. 88. – P. 263–274.
29. Rothman L.S., Gordon I.E., Babikov Y., et al. // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. – 2013. – V. 130. – P. 4–50.
30. Gordon I.E., Rothman L.S., Hill C., et al. // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. – 2017. – V. 203. – P. 3–69.

31. Jacquinet-Husson N., Armante R., Scott N.A., et al. // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* – 2016. – V. 327. – P. 31–72.
32. Rakhymzhan A.A. and Chichinin A.I. // *ISRN Analyt. Chem.* – 2013. – ID 592971. – 11 p. <https://doi.org/10.1155/2013/592971>.
33. Войцеховская О.К., Кузнецов С.В., Сапожников С.В. и др. // *Оптика атмосферы и океана.* – 1991. – Т. 4. – С. 938–953.
34. Dumitras D.C., Bratu A.M., and Popa C. *CO₂ Laser Photoacoustic Spectroscopy: II. Instrumentation and Applications. CO₂ Laser. Optimisation and Applications* / ed. Dr. Dan C. Dumitras. – 2012. – 102 p.
35. Force A.P., Killinger D.K., DeFeo W.E., and Menyuk N. // *J. Appl. Opt.* – 1985. – V. 24. – P. 2837–2841.
36. Войцеховская О.К., Каширский Д.Е., Егоров О.В. // *Изв. вузов. Физика.* – 2015. – Т. 58. – № 10/3. – С. 129–131.
37. Тимофеев Ю.М., Васильев А.В. *Теоретические основы атмосферной оптики.* – СПб.: Наука, 2003. – 474 с.
38. Brewer R.J. and Bruce S.W. // *J. Appl. Opt.* – 1978. – V. 17. – P. 3746–3749. <https://doi.org/10.1364/AO.17.003746>.
39. Адаменков А.А., Булкин Ю.Н., Колобянин Ю.В., Кудряшов Е.А. // *Оптика атмосферы и океана.* – 1995. – Т. 8. – С. 549–553.
40. Zhao Y. // *J. Appl. Opt.* – 2000. – V. 39. – P. 997–1007.
41. Войцеховская О.К., Волков Д.М., Каширский Д.Е., Корчиков В.С. // *Квантовая электроника.* – 2012. – № 7. – С. 634–639.

Поступила в редакцию 02.12.2020.

¹ Национальный исследовательский Томский государственный университет,
г. Томск, Россия

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
г. Томск, Россия

Войцеховская Ольга Кузьминична, д.ф.-м.н., профессор НИ ТГУ, e-mail: vok44@mail.tsu.ru;

Шефер Ольга Владимировна, д.ф.-м.н., доцент ИШИТР НИ ТПУ, e-mail: shefer-ol@mail.ru.