

ЛАЗЕРНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ

doi: 10.51639/2713-0568_2024_4_2_22
УДК 535.8:574.56:621.373
ГРНТИ 44.41.29 29.33.51
ВАК 01.04.21

Лазерная диагностика водорода. Часть 2

^{1*} Привалов В. Е., ² Шеманин В. Г.

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет,
195257, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29

² Филиал Белгородского государственного технологического университета
имени В. Г. Шухова в Новороссийске, 353919, Новороссийск, ул. Мысхакское шоссе, 75

e-mail: * vaevpriv@yandex.ru, shemanin-v-g@nb-bstu.ru

В работе рассмотрены перспективы использования водорода как нового вида экологически чистого топлива. Это требует создания систем для контроля его выбросов и утечек из емкостей хранения и трубопроводов. Однако дистанционный контроль и измерение концентраций молекул водорода представляет большую проблему. Выполнено компьютерное моделирование режимов работы современных лидаров комбинационного рассеяния света позволяет найти оптимальный вариант для дистанционного измерения концентрации молекул водорода в атмосфере.

Ключевые слова: энергетика, молекула водорода, лидар, комбинационное рассеяния света лазер, мониторинг, концентрация, время измерения, расстояние зондирования.

Введение

В 2020 году правительство России утвердило энергетическую стратегию Российской Федерации на период до 2035 года и ключевые меры развития водородной энергетики [1]. Сегодня в РФ появляются отдельные пилотные проекты с использованием водородной энергетики, но до массового внедрения дело пока не дошло. Например, в конце 2019 года в Санкт-Петербурге был запущен трамвай на водородном топливе, а ОАО «Газпром» и ОАО «РЖД» в качестве пилотного проекта обсуждают возможность запуска поезда на Сахалине на топливных водородных элементах. Все это свидетельствует о том, что развитие водородной энергетики продолжится, а это потребует совершенной диагностики водорода. Работы в этом направлении ведутся [2] и они легли в основу нашего обзора.

1. Зондирование молекул водорода лидаром комбинационное рассеяния света

Разработка новых лазерных систем для измерения концентрации молекул водорода на уровне концентраций порядка 10^{13} см⁻³ и выше в атмосфере на базе лидара КРС требует выбора оптической схемы и оптимального подбора параметров отдельных элементов такого лидара. Ранее было получено, что лидар КРС может использоваться для дистанционного измерения концентрации молекул на таком уровне на расстояниях до

сотен метров [1–3]. А в работах [4, 5] было предложено лидарное уравнение для КРС газовыми молекулами в атмосфере с учетом конечной ширины линии генерации. Оказалось, что учёт конечной ширины линии генерации реального лазера, соотношение ширин полос комбинационного рассеяния света и аппаратной функции лидара позволяет уточнить решение такого лидарного уравнения [4, 5].

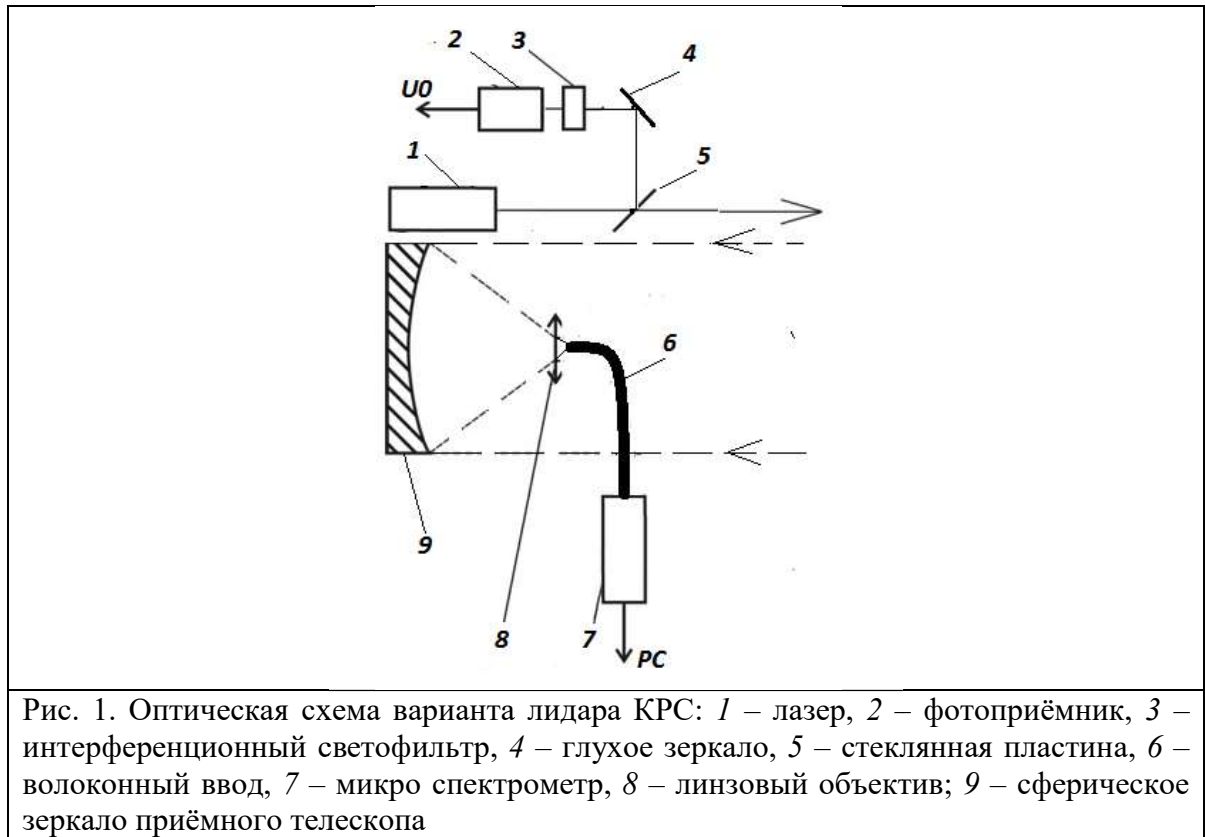
Поэтому оценка возможности измерений лидаром КРС концентрации молекул водорода на уровне 10^{13} см⁻³ и выше в атмосфере на расстояниях зондирования до 100 м в режиме синхронного счета фотонов [6] и выбор оптимальных параметров такого лидара.

Наряду с ДПП для обнаружения газовых молекул в атмосфере широкое распространение получил метод КРС молекулами в газовых потоках [1, 2, 5]. Поэтому наиболее вероятным представляется применение лидара КРС для дистанционного контроля источников выброса или утечки, концентрация молекул в которых может достигать 10^{16} см⁻³, что на два порядка выше типичных концентраций молекул водорода в атмосфере. Однако КРС является эффективным в аналитических целях из-за высокого пространственного разрешения, возможности калибровки и простоты аппаратной реализации. В работах [1, 5, 6] лидар КРС для дистанционного измерения концентрации молекул водорода был изготовлен на базе моностатического лидара, лазерный луч которого распространяется вдоль оси приемного телескопа (рис. 1) на некотором расстоянии. Это как раз биаксиальная схема и лазерный луч параллелен оси приемного телескопа [3, 5, 7, 8]. В качестве зондирующего излучения используется излучение третьей и второй гармоники YAG:Nd-лазера с накачкой полупроводниковым лазером с длинами волн 355 и 532 нм и полупроводникового лазера с длиной волны 405 нм с длительностью импульсов 10 нс и энергиями в импульсе до 1 мДж при частоте следования лазерных импульсов f до 100 кГц [1, 3, 9]. Излучение лазера l направлялось параллельно оси приемного телескопа на расстоянии 150 мм, как и в [1, 6], а излучение КРС молекулами водорода в атмосфере в направлении назад собиралось приемным телескопом типа Ньютона со сферическим зеркалом 9 диаметром 200 мм и фокусировалось линзовым объективом 8 в волоконный ввод 6 микро спектрометра 7, работающего на линии с ПК.

Часть лазерного излучения направлялось стеклянной пластиной 5 и глухим зеркалом 4 через интерференционный светофильтр 3 на фотоприёмник 2, напряжение U_0 с которого записывалось платой сбора данных в ПК, для контроля энергии лазерного импульса и формирования начала отсчёта времени измерения. Эти данные и выбранная часть спектра КРС молекулами водорода записываются в ПК для дальнейшей обработки.

Уравнение лазерного зондирования, или лидарное уравнение, для рассеяния Ми аэрозольными частицами в направлении назад или 180° было подробно рассмотрено в работах [1, 4] в предположении, что линия генерации лазера является дельта-функцией и не влияет на результаты зондирования. Однако реальные лазеры имеют спектр излучения конечной ширины. В работе [4] было предложено лидарное уравнение для упругого рассеяния аэрозольными частицами в атмосфере в направлении назад с учётом конечной ширины линии излучения. А авторы [10] выполнили численные расчёты лидарного уравнения для дифференциального поглощения и рассеяния газовыми молекулами в атмосфере с использованием генетического алгоритма. Эти работы показали, что учёт конечной ширины линии генерации лазера позволит уточнить решение такого лидарного уравнения, особенно для случая очень малых концентраций исследуемых частиц или молекул.

В настоящей работе учтём ширину линии генерации лазера и аппаратной функции в моностатическом лидаре КРС молекулами водорода в атмосфере. Рассмотрим оптическую схему такого лидара, приведенную на рис. 1.



Обычно регистрируемая лидаром энергия или мощность импульса КРС исследуемыми молекулами мала и поэтому используется режим счёта фотонов [1, 6, 11]. В этом случае лазер лидара удобнее характеризовать числом фотонов n_0 в импульсе посылаемого в атмосферу лазерного излучения длительностью τ_0 . Тогда для числа фотонов $n(\nu, z)$ излучения КРС исследуемыми молекулами водорода с концентрацией $N(z)$ на фотоприёмнике лидара можно переписать лидарное уравнение в направлении назад в режиме счёта фотонов в виде [4]:

$$n(\nu, z) = n_0 \frac{c\tau_0}{2z^2} G(z) f t S_0 N(z) (d\sigma/d\Omega) \int_{\nu_0 - \Gamma_0}^{\nu_R + \Gamma_R} T_0(\nu_0, z) \cdot T(\nu_R, z) \cdot \Phi(\nu) A(\nu) d\nu, \quad (1)$$

где $n(\nu, z)$ – число фотонов, зарегистрированное фотоприёмником лидара на частоте ν_R КРС с расстояния зондирования z ; n_0 – число фотонов на частоте ν_0 лазерного излучения и t – время измерения или накопления сигнала. Все остальные обозначения те же, что и в [1]. Функцию распределения фотонов лазерного излучения в линии генерации [11, 12] в нашем случае будем считать Гауссовой, а аппаратную функцию или спектральный коэффициент пропускания приёмной системы лидара $A(\nu)$ [1, 3, 5] будем считать Лоренцевой и настроена она точно на частоту ν_R полосы КРС молекулами водорода с полушириной Γ_a , которая больше чем Γ_R и Γ_0 . Лидарная константа K_1 на частоте ν_0 лазерного излучения измерена экспериментально в [5], а $\xi(\nu_R)$ – относительная спектральная чувствительность фотоприёмника на частоте ν_R излучения КРС взята из [13]. Перепишем уравнение (2) в виде

$$t = \frac{n(\nu, z) z^2}{BY(\nu, z) N(z)}, \quad (2)$$

где постоянная $B = \frac{c\tau_L}{2} S_0 \frac{P_0}{\sqrt{2\pi}\Gamma}$ и функция

$$Y(\nu, z) = 0,82 n_0 f G(z) \Gamma_0 K_1 \xi(\nu_R) \frac{d\sigma}{d\Omega} \exp[-\int_0^z \{\alpha(\nu_0, r) \cdot + \alpha(\nu_R, r)\} dr], \quad (3)$$

Также считаем, что дифференциальное сечение КРС можно считать постоянным внутри интервала интегрирования по частоте, как и коэффициенты ослабления на частотах лазерного излучения и КРС молекулами водорода [14]. В уравнении (3) время измерения t будет выступать мерой эффективности лидарной системы, а концентрационную зависимость решения этого уравнения и рассмотрим в виде

$$N(z) = \frac{n(v,z)z^2}{BY(v,z)t^2} \quad (4)$$

Также предположим, что полуширина аппаратной функции на порядок больше, чем полуширина линии генерации лазера, что вполне допустимо для промышленных лазеров и интерференционных светофильтров в качестве спектроанализатора лидара [1, 3, 5].

В работе [6] были выполнены лабораторные лидарные эксперименты для измерения дифференциального сечения КРС молекулами водорода. Решение лидарного уравнения для КРС типа (2) с параметрами нашего лидара позволило найти дифференциальное сечение КРС ($d\sigma/d\Omega$) молекулами H_2 при возбуждении лазерным излучением с длиной волны 532 нм. Полученное значение $(4,3 \pm 0,9) \cdot 10^{-30} \text{ см}^2/\text{ср}$ хорошо согласуется с данными для длины волны 337 нм – $8,7 \cdot 10^{-30} \text{ см}^2/\text{ср}$ в [15]. А это значение можно использовать для измерения концентрации молекул водорода $N(z)$ в газовых потоках и чистой атмосфере на заданных расстояниях от излучателя с высокой точностью и пространственным разрешением 7,5 м.

3. Моделирование и результаты

Используя это значение дифференциального сечения КРС молекулами H_2 , выполним компьютерное моделирование лидарного уравнения (3) для описанного выше варианта лидара КРС с биаксиальной [3, 5, 6] оптической схемой как на рис. 1. В качестве зондирующего излучения рассмотрим излучение третьей и второй гармоники YAG:Nd-лазера с накачкой полупроводниковым лазером с длинами волн 355 и 532 нм, газовых лазеров с длинами волн 377, 308, 510 и 578 нм и полупроводниковых лазеров с длинами волн 405, 650, 785 и 850 нм с длительностью импульсов 10 нс и энергиями в импульсе до 1 мДж при частоте следования лазерных импульсов f до 100 кГц [1, 9]. Излучение лазера I направлялось параллельно оси приёмного телескопа на расстоянии 150 мм, как и в [1, 3, 7], а излучение КРС молекулами водорода в атмосфере в направлении назад собиралось приемным телескопом типа Ньютона со сферическим зеркалом \varnothing диаметром 200 мм и фокусировалось линзовым объективом δ в волоконный ввод микро спектрометра FSD-8 б, который работал на линии с ПК.

Будем рассматривать однократное КРС и однородную атмосферу [1, 14, 16]. Значения максимума полосы валентных Н-Н колебаний молекул водорода равно 4161 см^{-1} по данным [1, 5, 15] и для всех длин волн лазерного излучения были рассчитаны длины волн полос колебательного КРС молекулами водорода, приведённые в таблице.

Значения дифференциальных сечений КРС для всех молекул ($d\sigma/d\Omega$) и всех выбранных длин волн лазерного излучения были определены по данным, экспериментально измеренным в [1, 15] при комнатной температуре и нормальном давлении на длине волны излучения 532 нм и для интересующих нас длин волн рассчитаны с учётом зависимости $1/\lambda^4$ [1]. Все эти значения приведены в таблице. Значения коэффициентов ослабления для этих частот $\alpha(v_0,z)$ и $\alpha(v_R,z)$ из [1, 16] также собраны в табл. 1. Поперечное сечение зеркала приемного телескопа лидара было $0,031 \text{ м}^2$, а шаг по расстоянию – 7,5 м для времени одного измерения 50 нс.

Таблица

Длины волн и частоты лазерного излучения и полос КРС молекул водорода, дифференциальные сечения колебательного КРС для этих полос, коэффициенты ослабления в атмосфере на этих длинах волн и относительная спектральная чувствительность фотоприёмника

Длина волны, λ , нм	Частота, ν , ГГц	Дифференциальное сечение КРС ($d\sigma/d\Omega$) 10^{30} см ² /ср	Коэффициент ослабления $\alpha(\nu_0, r)$, км ⁻¹	Коэффициент ослабления $\alpha(\nu_R, r)$, км ⁻¹	Относительная спектральная чувствительность фотоприёмника $\xi(\nu)$
H ₂		4161 см ⁻¹			
355	845,1	11,08	0,33		
416,5	720,3			0,24	0,61
532	563,9	4,3±0.9-21%	0,17		
683,2	439,1	2,2		0,14	0,92
405	740,7	6,54	0,24		
487,1	615,9			0,19	0,88
650	461,5	0,99	0,14		
891,0	336,7			0,12	0,24
785	382,2	0,46	0,13		
1165,8	257,3			0,11	0,05
850	352,9	0,34	0,12		
1315,1	228,1			0,11	0,03
377	795,8	8.7 [15]	0,29		
447,1	671,0			0,2	0,81
308	974,0	19.55	0,45		
353,3	849,1			0,31	0,1
510	588,2	2.60	0,18		
647,4	463,4			0,14	0,99
578	519,0	1.58	0,17		
761,0	394,2			0,12	0,64

С этими данными рассмотрим численное решение уравнения (2), полагая, что $G(z)$ в нашем случае равно 1, и концентрация молекул водорода – в диапазоне $N(z) = 10^{13} \dots 10^{17}$ см⁻³. Для нашей экспериментальной ситуации за время измерения t может быть зарегистрировано 200 фотонов [11, 12].

Для этого случая выполним решение уравнения (2) для всех значений длин волн лазерного излучения 355, 532, 405, 650, 785, 850, 377, 308, 510 и 578 нм с частотой следования лазерных импульсов 100 кГц, энергии в импульсе 1 мДж и диапазона расстояния зондирования от 10 до 1500 м. Результаты решения уравнения (3) для этого случая представлены на рис. 2 как зависимость времени измерения t от расстояния зондирования z для нашей экспериментальной ситуации.

На графиках рис. 2 видно увеличение времени измерения t в ряду длин волн лазерного излучения 377- 405- 532- 355- 510- 589- 308- 650- 785- 850 за счёт спектральной зависимости величин, входящих в уравнение (3), при этом величина времени измерения резко нарастает за первые 100 м примерно на порядок, а наименьшее значение t получаем для длины волны лазерного излучения 377 нм.

Для детального исследования этой зависимости рассмотрим отдельно результаты как наилучшие для первых пяти графиков и длин волн 532, 377, 405, 355 и 510 нм на рис. 3. В этом случае на рис. 3 все кривые удаётся различить и уточнить, что для больших расстояний порядка 1000 м наименьшее время измерения получается для длины волны 532 нм.

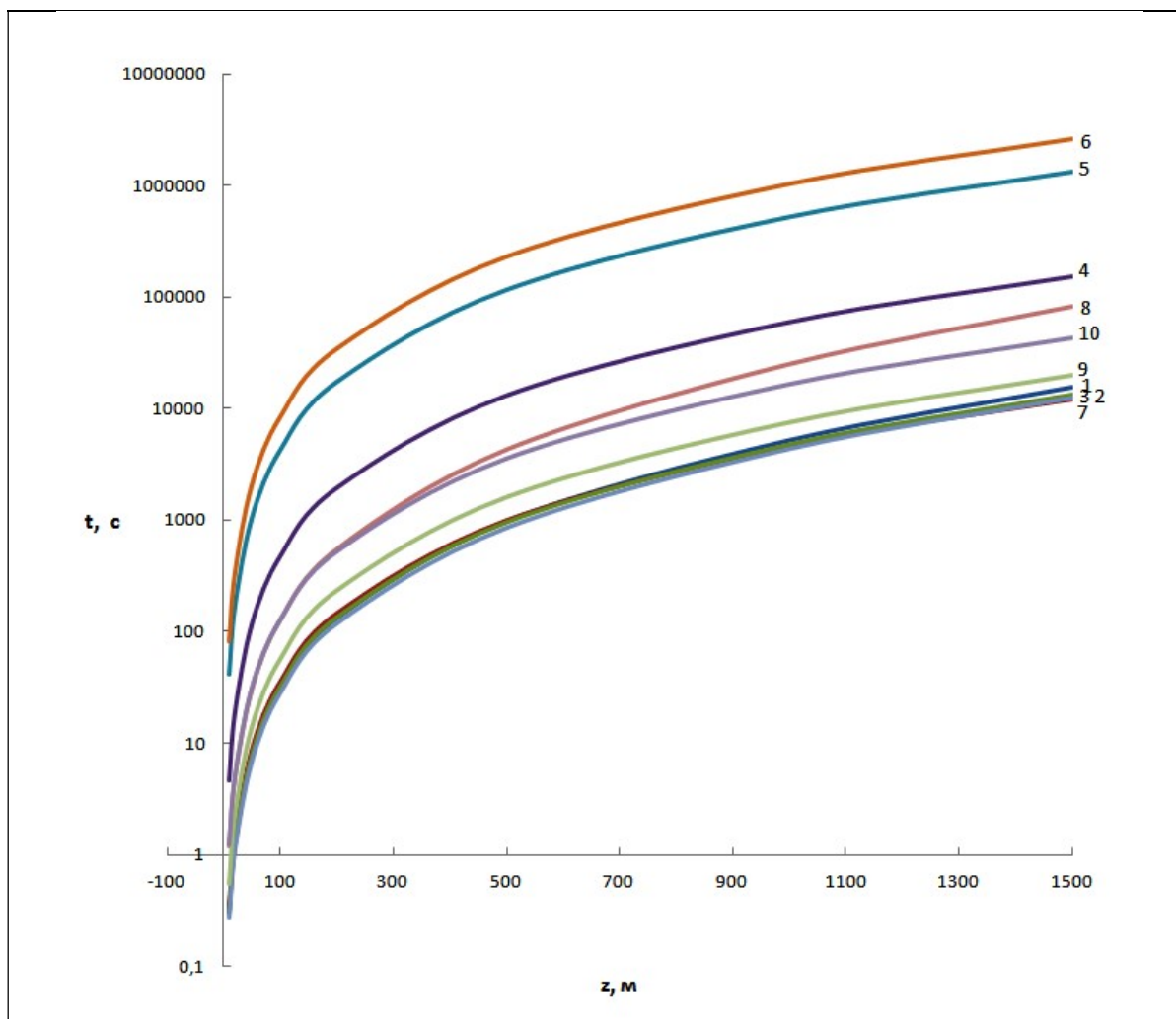
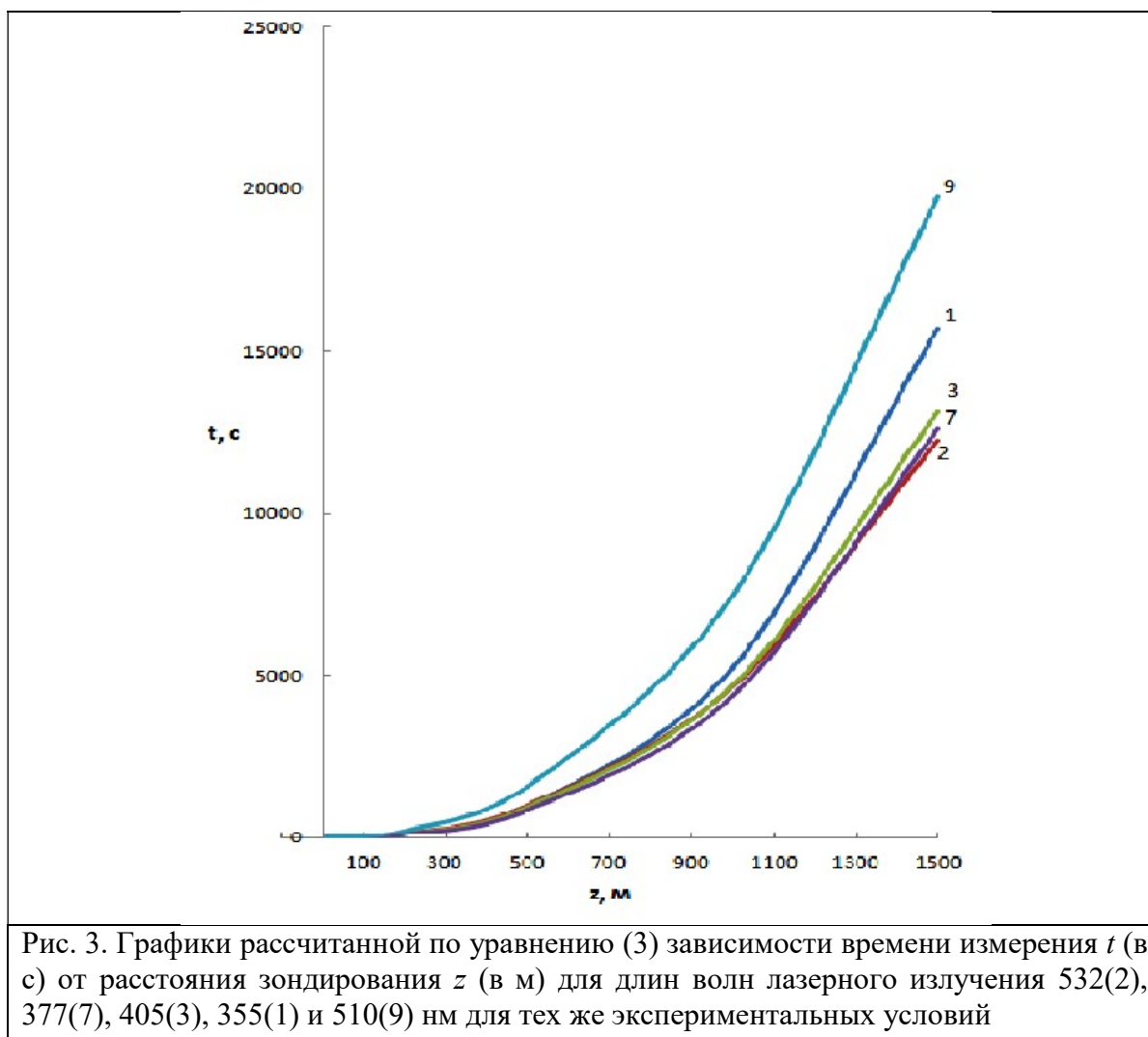


Рис.2. Графики рассчитанной по уравнению (3) логарифмической зависимости времени измерения t для молекул водорода с концентрацией $N(z) = 10^{13} \text{ см}^{-3}$ (в с) от расстояния зондирования z (в м) для длин волн лазерного излучения 532(2), 377(7), 405(3), 355(1), 510(9) 589(10), 308(8), 650(4), 785 (5) и 850(6) нм при зондировании атмосферы лидаром КРС

Более наглядно зависимость концентрации молекул водорода $N(z)$ от расстояния зондирования z для одного и того же времени измерения $t = 100$ с для всех длин волн лазерного излучения можно представить из уравнения (4). Рассмотрим численное решение уравнения (4) для диапазона концентрации молекул водорода $N(z)$ от 10^{13} см^{-3} до 10^{17} см^{-3} . Для этого выполним решение этого уравнения для длин волн лазерного излучения 377, 405 и 532 нм, как наилучшие варианты по данным рис. 3. Результаты решения уравнения (4) представлены на рис. 4.



Как видно из графиков рис. 4 кривые для выбранных длин волн лазерного излучения 377, 405 и 532 нм практически совпали, а увеличение концентрации на расстояниях зондирования более 1000 м на длине волны 377 нм отражает влияние спектральной зависимости пропускания атмосферы на результаты моделирования. Всё это означает, что в зависимости от ожидаемой реальной концентрации на заданном расстоянии зондирования можно будет по времени измерения выбрать параметры лазера, телескопа и фотоприемника для создания такой лидарной системы КРС молекулами водорода. Такой выбор определяется спектральной зависимостью дифференциальных сечений полосы колебательного КРС молекулами водорода, коэффициентов ослабления в атмосфере на этих длинах волн и относительной спектральной чувствительности фотоприемника. Очевидно, что дальнейшее уменьшение величины концентрации исследуемых молекул возможно за счёт увеличения частоты следования лазерных импульсов f или увеличения их энергии E_0 .

Таким образом, полученные результаты позволяют выбрать оптимальные параметры лазера и лидара КРС для зондирования молекул водорода в атмосфере на расстояниях зондирования до 1500 м. Причем они хорошо согласуются с результатами наших прежних работ [1, 5]. Чтобы зондировать молекулы водорода с концентрациями $N(z) = 10^{13} \text{ см}^{-3}$ на длине волны лазерного излучения 405 нм в диапазоне зондирования до 1500 м достаточно времени измерения от 0,3 с до 218,3 мин, что сложно реализовать в одном лидаре КРС в

конкретных экспериментальных условиях [1, 6]. Если ограничить диапазон зондирования 500 м, то достаточно будет времени измерения 15,8 мин. Поэтому, подбирая время измерения за счёт параметров того же лидара КРС, можно увеличить расстояние зондирования необходимых концентраций молекул водорода в атмосфере.

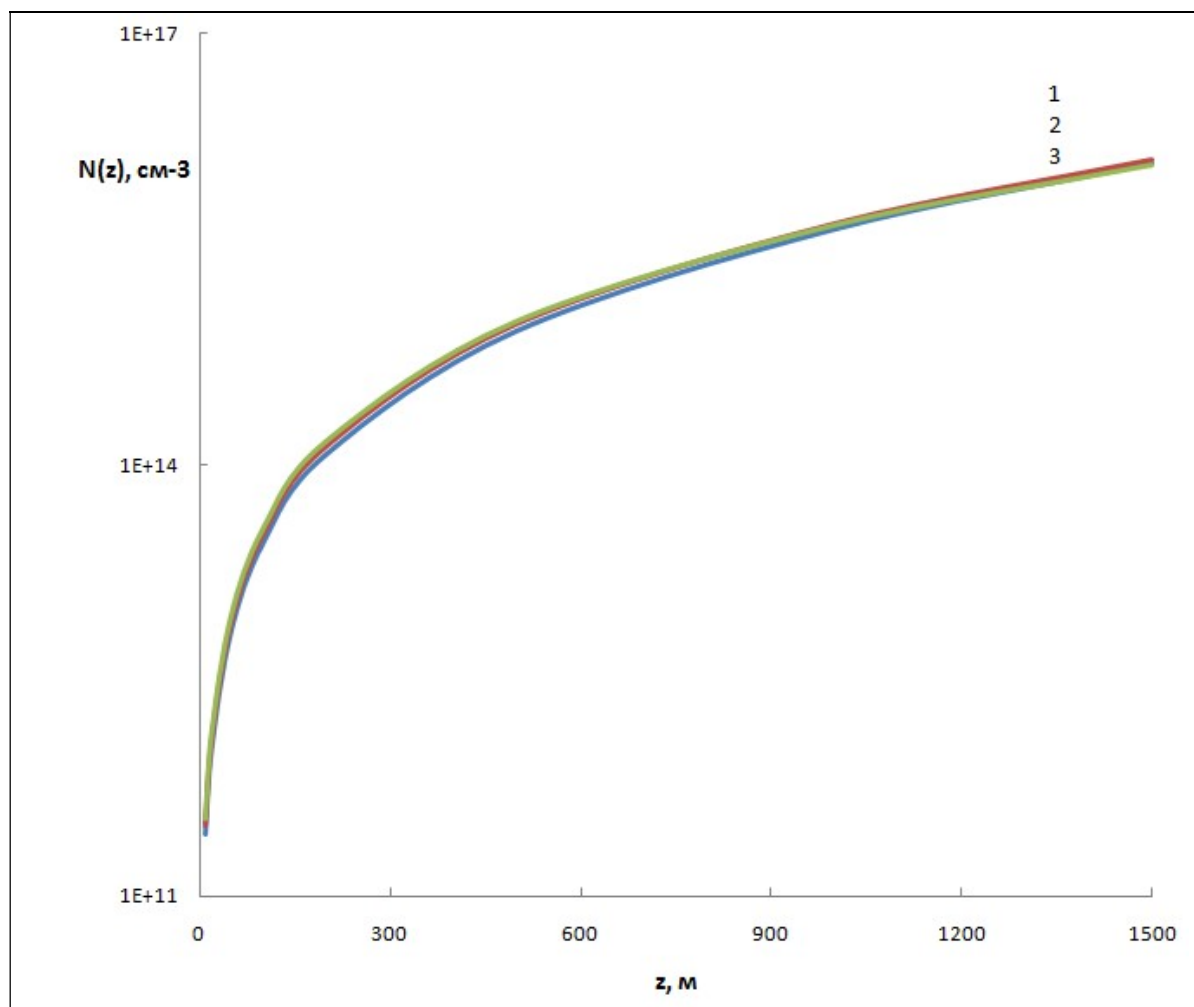


Рис. 4. Графики рассчитанной по уравнению (5) логарифмической зависимости концентрации молекул водорода $N(z)$ (в см^{-3}) от расстояния зондирования z (в м) для одного и того же времени измерения $t=10$ с для длин волн лазерного излучения 377(1), 405(2) и 532 (3) нм для той же самой экспериментальной ситуации

Заключение

Может создаться впечатление, что диагностика водорода нас интересует при утечках водорода во время эксплуатации потребляющих водород систем. Не только. Трудности с производством водорода вынуждают изучить вопрос с местами выхода водорода на поверхность Земли в результате дегазации. Известны, к сожалению, не очень редкие случаи взрывов на угольных шахтах. Говорят о взрывах метана в результате появления в шахте открытого огня, электрических искр и т. п. Скорее всего, это результат выхода водорода на поверхность в районе шахты и прохождения водорода через угольные пласты. Роль метана, скорее всего, вторична. По-видимому, мест выхода водорода на поверхность Земли много. Их надо разыскать и исследовать. Это можно сделать с помощью лидаров, размещённых на искусственных спутниках Земли. Уточнять детали

можно с помощью авиации, включая беспилотную. В этом случае часть вопросов по производству и транспортировке водорода отойдет на задний план. Возможно, что эффективнее будет не транспортировать водород к месту производства, а размещать производство, потребляющее водород, включая электростанции на водороде, в указанных местах. Там же располагать средства очистки водорода, что может привести к появлению новых химических производств. Таким образом, лидар станет не только средством диагностики работающих аппаратов и транспортной сети, но и одним из основных средств получения (производства) водорода. Возможно, это позволит обнаруживать и бороться с лесными пожарами.

В любом случае развитие водородной энергетики требует создания методов и систем совершенной дистанционной диагностики водорода. Работы в этом направлении ведутся и они легли в основу настоящего обзора.

Выполненная оценка возможностей дистанционных измерений лидаром КРС концентрации молекул водорода на уровне 10^{13} см^{-3} и выше в атмосфере на расстояниях зондирования до 1500 м в режиме синхронного счёта фотонов позволяет сделать выбор оптимальных параметров лазера и такого лидара.

В работах [1, 6] было экспериментально измерено дифференциальное сечение КРС ($d\sigma/d\Omega$) исследуемой молекулы H_2 на длине волны лазерного излучения 532 нм, которое равно $(4,3 \pm 0,9) \cdot 10^{-30} \text{ см}^2/\text{ср}$, что хорошо согласуется с данными для длины волны 337 нм $8,7 \cdot 10^{-30} \text{ см}^2/\text{ср}$.

Используя это значение можно измерять концентрацию молекул водорода $N(z)$ в газовых потоках и чистой атмосфере на заданных расстояниях от излучателя с высокой точностью и пространственным разрешением 7,5 м.

Компьютерное моделирование лидарного уравнения для ДПР также позволяет оценить параметры требуемого лидара для заданного диапазон концентраций исследуемых молекул водорода.

Таким образом, выполненное компьютерное моделирование режимов работы лидаров и варианты решения лидарного уравнения для КРС молекулами водорода и ДПР в атмосфере позволяет найти оптимальный вариант для дистанционного измерения концентрации молекул водорода в атмосфере, что подтверждается и данными [2, 6, 17].

Конфликт интересов

Авторы статьи заявляют, что у них нет конфликта интересов по материалам данной статьи с третьими лицами на момент подачи статьи в редакцию журнала, и им ничего не известно о возможных конфликтах интересов в настоящем со стороны третьих лиц.

Список литературы

1. Привалов В. Е., Шеманин В. Г. Лазерная диагностика водорода. Часть 1 // Лазеры. Измерения. Информация, 4(1), 16-26. извлечено от <https://lasers-measurement-information.ru/ojs/index.php/laser/article/view/82>.
2. Бобровников С.М., Матвиенко Г.Г., Романовский О.А. и др. Лидарный спектроскопический газоанализ атмосферы. Томск: Изд-во Ин-та оптики атмосферы, 2014. - 508 с.3. Weitkamp, C. (Ed.), 2005. Range-resolved optical remote sensing of the atmosphere. Springer, New York, NY, USA. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/b106786>
4. Привалов В.Е., Шеманин В.Г. Уравнение лазерного зондирования для реального аэрозоль Привалов В. Е., Шеманин В. Г. Лазерная диагностика водорода. Часть 1 //

Лазеры. Измерения. Информация. 2024. Том № 04. № 02 (14)
<https://lasers-measurement-information.ru>

Лазеры. Измерения. Информация, 4(1), 16-26. извлечено от <https://lasers-measurement-information.ru/ojs/index.php/laser/article/view/82>ного лидара . // Фотоника. 2013. №2(38), С. 72-78

5. Привалов В.Е., Шеманин В.Г. Параметры лидаров для дистанционного зондирования газовых молекул и аэрозоля в атмосфере. - С-Пб.: Балт. ГТУ “ВОЕНМЕХ”. 2001. - 56 с.
6. Privalov V.E., Shemanin V.G. Lidar Measurement of the Raman Differential Cross Section by Hydrogen Molecules. // Optical Memory and Neural Networks, 2023, Vol. 32, No. 1, pp. 34–38. DOI: 10.3103/S1060992X23010034
7. Chaikovskiy A.P., Grudo Ya.O., KarolYa.A. et al. Regularizing algorithm and processing software for raman lidar-sensing data/ // J. Appl. Spectrosc., 2015, V. 82. No.5. P. 779–787.
8. Зуев В.Е., Зуев В.В. Дистанционное оптическое зондирование атмосферы - Гидрометеиздат, СПб., 1992. 231 с.
9. Лазеры: применения и приложения. / Под ред. А.С. Борейшо. С-Пб.: Лань. 2016. 520 с.
10. Креков Г.М., Крекова М.М., Суханов А.Я., Лысенко А.А. Лидарное уравнение для широкополосного оптического излучения // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. №15. С. 8–15.
11. Глазов Г.Н. Статистические вопросы лидарного зондирования атмосферы. - Новосибирск: Наука, 1987 -308 с.
12. Долгих Г.И., Привалов В.Е. Лазеры. Лазерные системы. Владивосток: Изд. Дальнаука, 2009. 202 с.
13. <http://optofiber.ru/ru/spectrometers/mini-spektrometr>. Мини Спектрометр с волоконным входом FSD9-FSD10 v6-2 на диапазон 180-1080 нм с высокочувствительной ФПЗС линейкой TCD1304DG(M / X)
14. Донченко В.А., Кабанов М.В., Кауль Б.В., Самохвалов И.В. Атмосферная электрооптика. Томск: Изд-во НТЛ. 2010. С. 178-181
15. Лазерный контроль атмосферы. Под. ред. Э.Д.Хинкли. -М.:Мир, 1979 - 416 с.
16. Самохвалов И.В., Копытин Ю.Д., Ипполитов И.И. и др. Лазерное зондирование тропосферы и подстилающей поверхности. Новосибирск: Наука. 1987. 262 с.
17. Veselovskii I. Profiling of CH₄ background mixing ratio in the lower troposphere with Raman lidar: a feasibility experiment // Atmos. Meas. Tech. 2019. V. 12. No.1. P. 119–128.

Laser diagnostics of hydrogen. Part 2

^{1*} Privalov V.E., ² Shemanin V.G.

¹ *St. Petersburg Polytechnic University,
195257, St. Petersburg, 29 Politechnicheskaya str.,*

² *Branch of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov in Novorossiysk,
353919, Novorossiysk, 75 Myskhakskoe shausse str.*

e-mail: * vaevpriv@yandex.ru, shemanin-v-g@nb-bstu.ru

The paper considers the prospects of using hydrogen as a new type of environmentally friendly fuel. This requires the creation of systems to control its emissions and leaks from storage tanks and pipelines. However, remote monitoring and measurement of concentrations of hydrogen molecules is a big problem. Computer simulation of the operating modes of modern Raman lidars has been performed, which makes it possible to find the optimal option for remote measurement of the concentration of hydrogen molecules in the atmosphere.

Keywords: energy, hydrogen molecule, lidar, raman laser, monitoring, concentration, measurement time, sensing distance.

References

1. Privalov V. E., Shemanin V. G. Laser diagnostics of hydrogen. Part 1 // Lasers. Measurements. Information, 4(1), 16-26. retrieved from <https://lasers-measurement-information.ru/ojs/index.php/laser/article/view/82>.
2. Bobrovnikov S.M., Matvienko G.G., Romanovsky O.A. et al. Lidar spectroscopic gas analysis of the atmosphere. Tomsk: Publishing house of the Institute of Atmospheric Optics, 2014. - 508 p.3. Weitkamp, C. (Ed.), 2005. Range-resolved optical remote sensing of the atmosphere. Springer, New York, NY, USA. URL:<https://link.springer.com/book/10.1007/b106786>
4. Privalov V.E., Shemanin V.G. Laser sensing equation for a real aerosol lidar. // Photonics. 2013. No. 2 (38), pp. 72-78
5. Privalov V.E., Shemanin V.G. Parameters of lidars for remote sensing of gas molecules and aerosol in the atmosphere. - St. Petersburg: Balt. GTU "VOENMEKH". 2001. - 56 p.
6. Privalov V.E., Shemanin V.G. Lidar Measurement of the Raman Differential Cross Section by Hydrogen Molecules. // Optical Memory and Neural Networks, 2023, Vol. 32, No. 1, pp. 34–38. DOI: 10.3103/S1060992X23010034
7. Chaikovskiy A.P., Grudo Ya.O., Karol Ya.A. et al. Regularizing algorithm and processing software for raman lidar-sensing data/ // J. Appl. Spectrosc., 2015, Vol. 82. No.5. P. 779–787.
8. Zuev V.E., Zuev V.V. Remote optical sensing of the atmosphere - Gidrometeoizdat, St. Petersburg, 1992. 231 p.
9. Lasers: applications and supplements. / Ed. A.S. Boreysho. St. Petersburg: Lan. 2016. 520 p.
10. Krekov G.M., Krekova M.M., Sukhanov A.Ya., Lysenko A.A. Lidar equation for broadband optical radiation // Letters to the Journal of Technical Physics. 2009. Vol. 35. No. 15. P. 8–15.
11. Glazov G.N. Statistical issues of lidar sensing of the atmosphere. - Novosibirsk: Nauka, 1987 -308 p.
12. Dolgikh G.I., Privalov V.E. Lasers. Laser systems. Vladivostok: Dal'nauka Publishing House, 2009. 202 p.
13. <http://optofiber.ru/ru/spectrometers/mini-spektrometr>. Mini Spectrometer with fiber input FSD9-FSD10 v6-2 for the range of 180-1080 nm with a highly sensitive CCD line TCD1304DG(M/X)
14. Donchenko V.A., Kabanov M.V., Kaul B.V., Samokhvalov I.V. Atmospheric electro-optics. Tomsk: NTL Publishing House. 2010. P. 178-181
15. Laser monitoring of the atmosphere. Ed. E.D. Hinkley. -M.: Mir, 1979 - 416 p.
16. Samokhvalov I.V., Kopytin Yu.D., Ippolitov I.I., et al. Laser sounding of the troposphere and underlying surface. Novosibirsk: Nauka. 1987. 262 p.
17. Veselovskii I. Profiling of CH₄ background mixing ratio in the lower troposphere with Raman lidar: a feasibility experiment // Atmos. Meas. Tech. 2019. V. 12. No. 1. P. 119–128.