

ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА

doi: 10.51639/2713-0568_2023_3_1_4
УДК 535.8, 574.56, 621.373
ГРНТИ 29.33.51, 44.41.29
ВАК 1.3.19

Лазеры и энергетика

*¹Привалов В. Е. , ²Шеманин В. Г.

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
195251, Россия, г. Санкт-Петербург

² Филиал Белгородского государственного технологического университета
имени В.Г. Шухова в г. Новороссийске
353912, Россия, г. Новороссийск, Мысхакское шоссе 75

e-mail: * vaevpriv@yandex.ru, vshemanin@mail.ru

Развитие энергетики обеспечивает научно-технический прогресс. Расширение перспектив использования водорода как нового вида экологически чистого топлива 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. В обзоре рассмотрены методы и приборы лазерного дистанционного зондирования молекул водорода в атмосфере. Собраны, систематизированы и уточнены все опубликованные ранее результаты. Рассмотрены потенциальные возможности методов лидарного зондирования. Выполнено компьютерное моделирование режимов работы современных лидаров для лазерного мониторинга водорода в атмосфере. Приведены результаты моделирования конкретных экспериментов по дистанционному измерению концентрации молекул водорода в атмосфере, дан обширный справочный материал.

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

Введение

Научно-технический прогресс способствует развитию общества, в том числе энергетики. Развитие энергетики обеспечивает дальнейший научно-технический прогресс. Человек во все времена стремился, чтобы энергетика была эффективной и экономной. Со временем появились дополнительные требования. В том числе – экологические. Тип энергетики определяется, в первую очередь, топливом. В качестве топлива в традиционной энергетике много веков используют дрова, уголь, торф, нефтепродукты, включая природный газ ($C_3H_8 + C_4H_{10}$). Стали изучать возможность применять метанол, сероводород и т. п. Эти виды топлива, по крайней мере, ещё десятилетия, будут служить основой энергетики. К такой энергетике есть претензии. Теплотехника и механика характеризуются, как правило, низким коэффициентом полезного действия (КПД). Сжигание указанных видов топлива характеризуется выбросами окислов углерода, азота и др., что резко ухудшает экологическую обстановку. Поэтому взгляды энергетиков

сосредотачиваются на других энергоносителях и другом энергообмене (например, превращении химической энергии прямо в электрическую). Появляются международные проекты, предполагающие к середине нынешнего века исключить ископаемые энергоносители из энергетики.

1 Углевodородная энергетика

Во введении мы уже начали говорить о ней. Продолжим. Человек начал сжигать дерево почти одновременно со своим появлением на планете. Потом начали сжигать другие твёрдые, жидкие и газообразные топлива. Наиболее опасными считаются газы: утечки могут привести к отравлению, взрывам, пожарам и т. п. Подробнее об этом далее. Жидкие топлива менее опасны, но их испарения и протечки могут создать трудности. Твёрдые менее опасны, но отходов – больше: обгоревшие остатки и выбросы, прежде всего, окислов углеродов и азота. Сегодня эта энергетика наиболее распространена, поэтому её замена вызовет больше трудностей. Западные санкции это доказали. Всё надо делать постепенно, не нарушая сложившегося за долгие годы равновесия. Углевodородная энергетика будет нужна человечеству ещё долго. Способы добычи различных топлив освоены и совершенствуются. Ветряные и фотоэлектрические генераторы энергии следует совершенствовать, но сегодня они ещё полноценной заменой традиционных энергетик служить не могут.

2 Ядерная энергетика

Ядерная физика зародилась на стыке XIX и XX веков и в середине последнего появилось сначала ядерное оружие, а вскоре и электростанции, энергия которых получалась при расщеплении ядер веществ, которые служили топливом: уран, плутоний и др. В нашей стране ведущей организацией в этой отрасли является «Росатом». Название «атомная энергетика», которое чаще используется, мягко говоря, не очень точное: для получения энергии расщепляют не атом, а его часть – ядро. Безусловно, отрасль опасная, аварии на её предприятиях становятся предметом внимания и соседних стран и всего мира. Идут встречные процессы: ряд стран продолжают строить новые электростанции, некоторые – сворачивают и сейчас, когда Запад организовал энергетический кризис, начинают оживлять эту отрасль. Наша страна продолжает развивать отрасль и не только у себя. Например, новые станции продолжают строиться в Иране, Венгрии, Турции и др. Лазеры используются, как при строительстве, так и при эксплуатации станций. Главной опасностью ядерной энергетики является захоронение отходов; есть опасность и в процессе эксплуатации станций. Считается, что люди, работающие с радиацией, подрывают своё здоровье и долго не живут. Нам неизвестна статистика, но известны даты жизни отдельных людей. И. Халатников – непосредственный участник работы в 1940 – годах над бомбой, которую по привычке называют атомной, умер в 2021 г. на 102 году жизни. Н. А. Доллежалъ (1899–2000), строивший ядерные реакторы – примерно столько же. Известны другие долгожители. У ядерной энергетики много достоинств. В частности, она позволяет снизить выбросы углекислого газа на планете. Например, ядерная энергетика позволила сократить выбросы CO₂ в 2010 году на 4 млрд тонн в год (16 % всего годового техногенного выброса). Надо ещё помнить, что CO₂ поглощают наши экосистемы (леса, болота, степи и т. д. питаются этим газом), т. е. надо соблюдать равновесие.

3 Водород и его соединения

Водород, по-видимому, самый распространённый элемент в Солнечной системе. В виде плазмы он составляет около половины массы Солнца и большинства звезд. Из водорода, в основном, состоят газы межзвёздной среды и газовые туманности. Корпускулярное излучение Солнца и космические лучи в значительной мере состоят из протонов – ядер атомов водорода. Содержание водорода в земной коре – 1 % по массе и 16 % по числу атомов. В атмосфере планеты находится примерно 2,5 миллиардов тонн водорода. Он уходит в космос по 250 тысяч тонн в год. Источником восполнения является водородное «дыхание» Земли», то есть водородная дегазация. После завершения процесса формирования планеты, радиогенный разогрев вещества планеты приводил к разложению гидридов с выделением водорода [1]. В. И. Вернадский [2] считал, что термодинамические и химические условия глубин Земли позволяют предполагать возникновение среды, благоприятной для наличия водорода, с ростом глубины. Активность химических реакций уменьшается, исчезает кислород, начинают преобладать металлы, растёт количество водорода. При этом температура и давление растут. Это должно привести к появлению соединений водорода, в том числе растворённого в металлах. Водородная дегазация планеты – явление выделения водорода в смеси с другими газами (чаще всего углеводородами, гелием и радоном) в рифтовых зонах, при извержениях вулканов, из разломов земной коры, кимберлитовых трубок, некоторых шахт, и скважин.

Все процессы на Земле следует рассматривать с учётом водородной дегазации [3]. Землетрясения тектонического происхождения сопровождаются увеличением содержания водорода в воздухе. До поверхности нашей планеты водород доходит в виде углеводородов, воды и в виде газа H_2 . Единственным объяснением водородной дегазации Земли является наличие достаточно больших запасов водорода в недрах, а также круговорот водорода в системе – недра-поверхность-недра. К возможным источникам водорода относят и вулканы [4]. Существует предположение, что абиогенная нефть и природный газ образуются из неорганических веществ в мантии Земли при условии достаточной концентрации водорода во флюидном потоке и мигрируют в земную кору. Особенно хорошо это наблюдается в современных осях расширения океанов [1].

Практически весь земной водород связан в соединениях. Очень редко в минимальных количествах встречается свободный водород в вулканических и других природных газах. Крайне незначительно его содержание и в атмосфере Земли (0,0001 % по числу атомов, если не считать, конечно, водорода водяных паров). В составе воды – самого распространенного на Земле вещества – водорода 11,19 % по массе. Все водородсодержащие молекулы, начиная с воды и кончая белками и ферментами (сложными биополимерами), содержат водород в связанном виде. То есть, всё многообразие молекул углеводородов – это разнообразные гидриды различного атомного состава.

В соединениях водород обычно проявляет степень окисления (валентность) + 1, т. е. ведёт себя подобно щелочным металлам. Однако в гидридах – соединениях водорода с металлами – ион водорода отрицательно одновалентен (-1). Этим объясняется двойственное положение водорода в таблице элементов: его помещают одновременно и в I и в VII группу. Водород обладает ярко выраженными восстановительными свойствами, но при обычных условиях химическая активность молекулярного водорода в отличие от щелочных металлов вполне умеренна. Без нагрева он реагирует лишь с фтором (даже в темноте) и с хлором (на свету). Реакция синтеза воды (водород плюс кислород) при нормальных условиях идёт очень медленно. Нагревание, естественно, ускоряет её. При температуре выше 550°C она носит характер взрыва.

С неметаллами водород, как правило, взаимодействует активнее, чем с металлами. Из последних предпочитает химически активные – щелочные и щёлочноземельные. В этих реакциях образуются гидриды. Далеко не все соединения водорода с металлами построены так просто, как гидриды щелочных и щёлочноземельных металлов: валентность водорода –1, металла – +1 или + 2 состав соединений соответственно MeH или MeH_2 . Эти гидриды – их называют солеобразными – образованы классическими ионными связями. Они хорошо изучены и довольно широко применяются в технологиях. Гидрид кальция, например, CaH_2 используют в порошковой металлургии, с его помощью получают титан, тантал, ниобий, цирконий.

Чтобы удалить с металла окисную пленку, иногда применяют слабый, 1,5...2 %-ный раствор гидрида натрия в едком натре. Этот же гидрид (и гидрид лития) используют, получая бороводороды. Но вот строение бороводородов в рамки классических представлений о валентности не укладывается. Эти гидриды, так же как гидриды гелия и элементов IV, V, VI и VII групп (главных подгрупп), называют летучими гидридами. Химическая связь в них – ковалентная или полярная.

Бурное развитие химии и технологии соединений фтора привело к появлению многочисленных фторсодержащих продуктов. Фтор в последнее время стал основой ряда крупномасштабных производств, выпускающих соединения, без которых сейчас не обходится ни одна отрасль промышленности. Фтористый водород HF занимает исключительное место в промышленной химии фтора. Он служит исходным сырьем для получения подавляющего большинства неорганических и органических фторсодержащих соединений, и спрос на него в последнее время постоянно растет. Около половины потребления HF приходится на производство органических соединений, в первую очередь хлорфторуглеродов и фторполимеров. Большие количества его расходуются на производство фторида алюминия AlF_3 и синтетического криолита. Большое значение имеют также такие области применения, как обработка поверхности металлов, каталитическое алкилирование в нефтехимической промышленности, производство газообразного фтора и травление поверхности полупроводников для электронных устройств. Газообразный HF – бесцветный газ с резким запахом, очень вредно действующий на дыхательные органы и слизистые оболочки. Его предельно-допустимая концентрация (ПДК) составляет $0,005 \text{ мг/м}^3$ или $9 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$. Но особенно большие концентрации фтороводорода выделяются при нанесении гальванических покрытий (при фосфатировании) на изделия (концентрация HF в отводимом воздухе достигает $1,2...15 \text{ г/м}^3$).

Есть ещё гидриды металлические (металлообразные). Как правило, это твёрдые растворы водорода в металле. По свойствам и характеру химической связи эти гидриды сходны с металлами. К гидридам этой группы относится, в частности, двойной гидрид переменного состава $TiFeX_x$ его применяют в экспериментальных автомобильных двигателях, для которых горючим служит выделенный из гидрида водород.

4 Производство водорода

Основным способом производства наиболее чистого водорода считается электролиз воды (например, [5, 6]). Этот водород называют «зелёным». Есть водород других «цветов»: серый, голубой и т. д. – они менее чистые, чем зелёный, и считаются бесперспективными для экологичной энергетики. Ведутся споры. «Зелёный» водород требует для своего производства больше энергии, чем выделит водород при сгорании. Идут поиски. Постоянный ток заменили переменным. Есть другие предложения (например, с

применением лазеров [7–9]). Этому предшествовали работы [10–11], которые в корне изменили подход к проблеме.

Первым шагом в водородную энергетику можно считать доклад Сесила «Водород в машинном оборудовании» (Кэмбридж, 1820 г.). Создатель двигателя внутреннего сгорания Николаус Отто в 1830 г. экспериментировал с водородом. В блокадном Ленинграде около 300 грузовиков было переведено на водород. В СССР на Волжском автомобильном заводе (ВАЗ) в 1970-е годы выпускали водородомобили. Тогда же были созданы водородные самолеты ТУ-154В и ТУ-155. Но только на стыке XX и XXI веков этот интерес начал приобретать всеобъемлющий характер. Среди всех элементов таблицы Д. И. Менделеева водород обладает наибольшей теплотой сгорания. Поэтому водородная энергетика имеет перспективы не только при термоядерной реакции, но и при прямом сжигании водорода. Сдерживающим фактором является дороговизна производства водорода. При электролизе воды затрата энергии превосходит энергию горения водорода. Сегодня более 90 % водорода производится паровой конверсией природного газа или метана. Другой способ – газификация угля. Оба способа примерно вдвое дешевле электролиза воды. Однако рентабельность не обеспечивают. Самый чистый водород получается электролизом воды. На постоянном токе – это неэффективно, т. к. сжигание такого водорода даёт меньше энергии, чем требует электролиз. Способы разложения воды совершенствуются. Перешли на переменный ток. Совершенно другой подход – топливную ячейку – предложил автор [10–11]. Далее это предложение совершенствуется (например, [7–9]). Основным достоинством предложенной в работе [10] топливной ячейки являются малые токи, при которых происходит разложение воды. При этом к ячейке приложено и сравнительно небольшое импульсное напряжение. Ячейка остается холодной. Для грубой оценки модели можно рассмотреть падение капли воды в гравитационном поле и в поперечном электрическом поле. Легко показать, что траекториями молекул водорода и кислорода являются отрезки прямых линий. Это упрощает разделение газов и дальнейшую работу. Нашлось место и лазеру в тесной топливной ячейке [7,8]. На XXVI Международной конференции «Лазерно-информационные технологии – 2018» мы уже затрагивали эту тематику [9] и предложили для повышения энергетической эффективности ввести в зону реакции лазерное излучение с длинами волн, соответствующими возбуждению уровней молекулы воды [4]. Многократное прохождение излучения повышает эффективность. Естественно, используется лазер с подходящими длинами волн или несколько лазеров.

Современное общество сложно представить без электричества. В связи с ограниченностью рентабельных для добычи ископаемых видов топлива, таких как нефть, газ, уголь, уран, переход на нетрадиционные методы получения энергии становится необходимостью. Одним из таких методов является водородная энергетика [12, 13]. Хотя водород является самым распространённым элементом на Земле, но проблема заключается в том, что он находится во все возможных соединениях и отсутствует в чистом виде. В связи с этим разрабатываются новые и модернизируются уже используемые методы его получения. В настоящее время в промышленности применяются четыре основных способа:

- Конверсия метана водяным паром в реакторах с кипящим слоем дисперсного катализатора;
- Газификация углерода твёрдого топлива водяным паром;
- Термическое разложение (пиролиз) метана;
- Электролиз воды постоянным током.

Каждый из этих способов имеет свои достоинства и недостатки, но для каждого требуется большое количество условного топлива для получения необходимого водорода. В

таблице 1 приведён коэффициент удельного расхода условного топлива необходимого для производства 1 кг водорода [12].

Таблица 1

Коэффициент удельного расхода условного топлива для указанных методов [12]

Коэффициент удельного расхода b^* , (кгУТ)/ (кг H ₂)	Способ получения			
	Конверсия	Газификация	Пиролиз	Электролиз
	4,74	6,24	7,56	27,77

Этот параметр является одним из главных факторов, формирующих высокую себестоимости производимого водорода. В настоящее время его стоимость слишком велика для использования в качестве топлива для электрогенераторов (1 кг водорода \approx 40 руб.). Большая его часть поставляется нефтехимическим производствам для различных технологических процессов. Указанный в таблице 1 электролиз – традиционный, т. е. расщепление воды происходит под действием больших токов постоянного напряжения [12]. Сократив расход топлива до минимума, появится возможность перевода электрогенераторов с ископаемых видов топлива, на почти неисчерпаемый водород. Это является актуальной задачей современности.

Производство водорода не относится к инновациям [14], он производился миллионами тонн ещё в советские времена, когда его использовали для производства аммиака для получения азотных удобрений. Сегодня производится в РФ примерно 350 000 тонн в год. Водород и сегодня используют для производства удобрений, повышения качества бензина, улучшения свойств стали, а также в пищевой промышленности для производства маргарина и твёрдых кондитерских жиров методом гидрогенизации растительных масел. Без него не обходятся все процессы гидроочистки, гидрообессеривания, гидрокрекинга, регенерации катализаторов. Его также широко применяют для охлаждения генераторов на электростанциях.

С тех пор как появилась перспектива перехода с углеводородной энергетики на водородную [13], потребность в водороде увеличилась на порядки. Сегодня эта перспектива стала реальностью, поскольку примерно десять лет назад была решена одна из основных проблем с его хранением для дальнейшего использования в качестве автомобильного топлива. Вместо тяжёлых, дорогих и небезопасных стальных баллонов для сжатого под высоким давлением водорода стали применять легкие композитные ёмкости из углепластика, которые прекрасно помещаются в легковых автомобилях. Кроме того, стало возможным получать водород прямо по месту употребления. Появление таких технологий зажгло для водородной энергетики зелёный свет.

К одному из главных преимуществ водорода, по сравнению с остальными видами топлива, относят то, что при его горении образуется только вода и тепло. Это существенно скажется на состоянии окружающей среды [13].

В настоящее время ведутся разработки в различных областях данного направления. Транспортировка водорода в nano трубках, покрытие электродов различными оксидами металлов, использование новых электролитов, применение различных параметров среды в которых происходит реакция и т. д. Всё это повышает КПД установок [15].

Сегодня существуют установки, которые способны обеспечить высокую выработку водорода, но их размеры и необходимость в энергии не дают возможность к их применению в большом ряде отраслей промышленности, в том числе в автомобильной

отрасли. Однако технология способная полностью обеспечивать автомобиль водородом уже была разработана и реализована в жизнь еще в прошлом веке [10–11]. Самое главное в этой технологии то, что всё это работало от обычного автомобильного аккумулятора 12 В. Эти работы продолжены в [16]. Их актуальность связана, в первую очередь, с перспективностью расщепления воды под действием электрического поля, т.е. реализация поляризационного электролиза, который позволит существенно снизить затраты на электроэнергию. В [17] были достигнуты наибольшие успехи, но по данным других исследователей, проблема заключается в получении резонанса и подбора необходимых частот для достижения необходимой поляризации молекулы воды.

В настоящее время развитие разработки С. А. Мейера [10, 11] идёт в направлении повышения КПД созданной водородной ячейки и уже удалось добиться энергетической эффективности при импульсном реактивном электролизе порядка 70 % и выше [16]. Применение лазера [7–9] может здесь помочь.

В 2020 году правительство России утвердило энергетическую стратегию Российской Федерации на период до 2035 года и ключевые меры развития водородной энергетики [14]. 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.

Всё это свидетельствует о том, что развитие водородной энергетики продолжится, а это потребует совершенной диагностики водорода. Работы в этом направлении ведутся [18] и они легли в основу следующего раздела нашего обзора.

5 Лазерная диагностика водорода

Лазерной диагностикой водорода мы занимаемся с прошлого века. Выпустили десятки работ и в этом разделе обзора, предполагаем систематизировать некоторые результаты. Без подробного знакомства с библиографией проникнуть в суть задач и методы их решения трудно.

5.1 Лидары. Принцип действия и классификация

Основой методов лазерного зондирования служат оптические явления, возникающие при взаимодействии лазерного излучения с газовыми молекулами и аэрозолем атмосферы: Рэлеевское рассеяние, комбинационное рассеяние света (КРС), рассеяние Ми на аэрозольных частицах, флуоресценция и поглощение. Экспериментально наблюдаемые диапазоны сечений каждого из процессов приведены в [19]. Как следует из данных [19] сечение рассеяния Ми может быть настолько большим, что даже незначительное количество дисперсных частиц соответствующих размеров может дать сигнал рассеянного излучения полностью перекрывающий сигналы Рэлеевского или КРС. Это свойство дисперсных частиц широко используется для регистрации малых концентраций частиц [20].

Хотя резонансное рассеяние, называемое атомной или резонансной флуоресценцией, также имеет большое сечение, тушение при столкновениях с более распространёнными составляющими атмосферы обычно приводит к сильному ослаблению резонансного сигнала. Поэтому наиболее эффективно этот метод может работать при исследованиях малых составляющих в разряженной атмосфере [19]. Широкополосная природа молекулярной флуоресценции является причиной низкого значения отношения сигнала к

шуму, при этом основной вклад в шум даёт фоновое излучение [20]. С ростом длительности сигнала флуоресценции падает и пространственное разрешение метода. КРС можно рассматривать как неупругий процесс, при котором лазерное излучение вызывает переход молекулы на виртуальный уровень с последующим мгновенным (порядка 10 фс) излучением на длине волны, отличной от лазерной. Разность энергий падающего и испущенного фотонов является характеристикой рассеивающей молекулы и обычно соответствует изменению колебательного квантового числа на единицу. Чувствительность этого метода низка из-за незначительной величины сечения КРС.

Поэтому наиболее вероятным представляется применение КРС для дистанционного контроля дымовых шлейфов труб, концентрации составляющих в которых могут быть 10...100 ppm по сравнению со значениями 0,1...5,0 ppm, типичными для малых составляющих в атмосфере [21]. Некоторое увеличение сечения (до трёх порядков) возможно в тех случаях, когда возбуждающая частота близка к частоте разрешенного перехода. Однако, в [22] показано, что такого повышения чувствительности при резонансном рассеянии не удаётся реализовать из-за сильного поглощения лазерного и рассеянного излучения. Метод КРС позволяет определить отношение концентрации любой составляющей к концентрации некоторой стандартной компоненты (например, азота) по отношению сигналов КРС при условии, что отношение сечений рассеяния известно [23].

Сечение поглощения обычно значительно превышает как эффективное (с учётом тушения) сечение флуоресценции, так и сечение КРС. Следовательно, на основе ослабления лазерного излучения с соответствующим образом подобранной частотой можно создать чувствительный метод определения средней концентрации выбранной составляющей. Для того, чтобы выделить вклад поглощения интересующей молекулы в ослабление лазерного луча, обычно применяется метод дифференциального поглощения. В этом методе предполагается использование двух длин волн лазерного излучения: одной – в центре полосы поглощения молекулы, а другой – в крыле этой полосы. Большинство полос поглощения молекул, представляющих интерес для дистанционного зондирования, лежит в инфракрасной области спектра и соответствует колебательно-вращательным переходам [24, 25]. К основным недостаткам этого метода относятся низкое пространственное разрешение и недостаточная чувствительность инфракрасных детекторов. Высокие чувствительность и пространственное разрешение могут быть достигнуты при сочетании дифференциального поглощения с рассеянием (ДПР). Этот метод впервые был предложен для дистанционного определения содержания водяного пара в атмосфере [26]. Он основан на сравнении рассеянных назад лазерных сигналов: одного – в максимуме линии поглощения молекулы, а другого – на крыле линии. В этом случае пространственное разрешение и мощные сигналы на используемых длинах волн обуславливаются большим сечением рассеяния M_i , а отношение сигналов даёт требуемую величину дифференциального поглощения. Благодаря этому, метод ДПР обладает наилучшей чувствительностью при зондировании некоторых молекулярных составляющих атмосферы с больших расстояний. Хотя чувствительность фотодетекторов делает методы, основанные на флуоресценции и ДПР, более пригодными для зондирования молекул, имеющих полосы поглощения в видимой и ближней ультрафиолетовой областях спектра, повышение чувствительности инфракрасных детекторов придаёт методу ДПР более универсальный характер [19]. Именно поэтому в последнее время получили широкое распространение лидары ДПР, которые используются во всех видах лазерной дистанционной техники, основанной на резонансном поглощении. Использование коротковолновых лазеров позволяет расширить спектр приложений лидаров за счёт возможности использования индуцированной лазерным излучением

флуоресценции. Это привело к разработке новой лазерной системы дистанционного зондирования, получившей название лазерного флуориметра [19]. Однако его применение возможно только для измерения концентрации атомов водорода по регистрации индуцированной лазером резонансной флуоресценции [27].

Следовательно, для дистанционного зондирования молекул водорода в атмосфере возможно использование методов, основанных на ДПР и КРС.

Именно создание лазеров привело к разработке большого класса лазерных систем дистанционного зондирования [28]. Главными и определяющими в дистанционном зондировании являются лазеры, которые способны генерировать спектрально-ограниченные импульсы излучения наносекундной длительности высокой мощности и небольшой угловой расходимости. В тех случаях, когда сигнал является очень слабым, необходима также высокая частота повторения импульсов. Всё многообразие лазеров, которые могут быть применены для зондирования газовых молекул, представлены в ряде монографий, например [29, 30]. Ещё более широкие возможности по применению лазеров открываются при использовании генерации высших гармоник, параметрической конверсии или комбинационного сдвига и перестраиваемых лазеров на красителях. Применение модуляции добротности даёт возможность получать пиковую мощность до 50 МВт при длительности импульса порядка 10 нс. Приемлемыми обычно являются углы расходимости пучка порядка 1 мрад., а частота повторения импульсов до 10 кГц. Часто оказывается необходимым преобразование основного излучения лазера во вторую, третью и четвертую гармоники, как в случае АИГ: Nd лазера. Это связано с тем, что основная длина волны излучения такого лазера, равная 1,064 мкм, представляет интерес для тех приложений, в которых используется рассеяние Рэлея и Ми. Удвоение или утроение частоты достигается за счёт применения соответствующих нелинейных кристаллов, причём эффективность преобразования зависит от оптического качества кристалла, рабочей длины волны, интенсивности и степени когерентности лазерного пучка. Верхний предел КПД преобразования может достигать 70 % [36].

Класс газовых лазеров является наиболее многообразным: в него входят самые коротко- и длинноволновые лазеры, лазер с самым высоким КПД и наиболее мощный непрерывный аргоновый лазер [15]. CO₂-лазер низкого давления генерирует импульсы с энергией до 10 Дж и частотой повторения до 10 Гц и может достигать КПД 20 %. Для дистанционного зондирования могут представлять интерес эксимерные лазеры, так как длины волн их излучения лежат в УФ области спектра (менее 308 нм), длительности импульсов 10...20 нс с энергией до 0,5 Дж.

К главным достоинствам полупроводниковых лазеров следует отнести небольшие размеры и эксплуатационную надёжность конструкции, прямое электрическое возбуждение с возможной быстрой перестройкой длины волны за счёт изменения плотности тока, высокий КПД (до 50 %) и широкий спектральный диапазон (0,6...34 мкм). Однако их отличает небольшая пиковая мощность (до 100 Вт) и большая расходимость луча [33].

По результатам выполненных ранее исследований различных типов лидаров [25–29, 30, 31, 51–53], предназначенных для зондирования газовых потоков или газовых молекул в атмосфере, можно предположить, что для обнаружения концентраций молекул порядка 10^{13} см⁻³ и выше в атмосфере будет наиболее предпочтительным использование систем ДПР. Это объясняется тем, что сечение поглощения значительно превышает эффективное (с учётом тушения) сечение флуоресценции и КРС [19]. Поэтому на основе ослабления лазерного излучения с соответствующим подбором длины волны можно создать чувствительный метод измерения концентрации молекул водорода в атмосфере.

5.2 Зондирование молекул водорода в атмосфере лидаром ДПР

Большие перспективы использования водорода как чистого топлива требует создания систем для контроля его утечки из баллонов и трубопроводов, особенно в местах эксплуатации и перекачки. В реальной атмосфере доля молекул H_2 составляет $5 \cdot 10^{-7}$ мольных доли (0,5 ppm) [19] или $1,345 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Поэтому дистанционный контроль и измерение концентраций на таких уровнях представляет большую проблему [34].

В настоящее время используется стандартное оборудование, которое позволяет проводить лишь импактные измерения с предварительным отбором, подготовкой пробы и её анализом [35]. Это может быть газовая хроматография [36] или спектрофотометрия в вакуумном ультрафиолете [35]. Недостатком этих способов является низкое быстродействие при проведении анализа (около 10 мин.), что усложняет их применение при проведении газовой съёмки на больших площадях.

По результатам выполненных ранее исследований различных типов лидаров [26, 37–39], предназначенных для зондирования загрязняющих веществ в газовых потоках или чистой атмосфере, можно заключить, что для обнаружения концентраций $N(z)$ загрязняющих веществ порядка 10^{15} см^{-3} и ниже в атмосфере будет наиболее предпочтительным использование систем дифференциального поглощения. На основе ослабления лазерного излучения с соответствующим подбором длины волны можно создать чувствительный метод измерения концентрации загрязняющих веществ в атмосфере.

Оптическая плотность слоя молекул водорода в атмосфере определяется соотношением лидарных сигналов на двух выбранных длинах волн. При известном сечении резонансного поглощения σ_0 молекулами водорода можно довольно эффективно использовать зависимость оптической плотности от концентрации молекул при дистанционных измерениях их концентрации в атмосфере.

Вариант лидара ДПР предполагает использование двухволнового излучателя: одна длина волны лазерного излучения попадает в центр полосы поглощения молекулы, а другая— вне этой полосы [40]. В качестве такого излучения можно использовать, например, две гармоники YAG–Nd-лазера на длинах волн 1064 и 532 нм как в [41, 42]. В нашем варианте [38] для зондирования молекул водорода используется лазерное излучение на

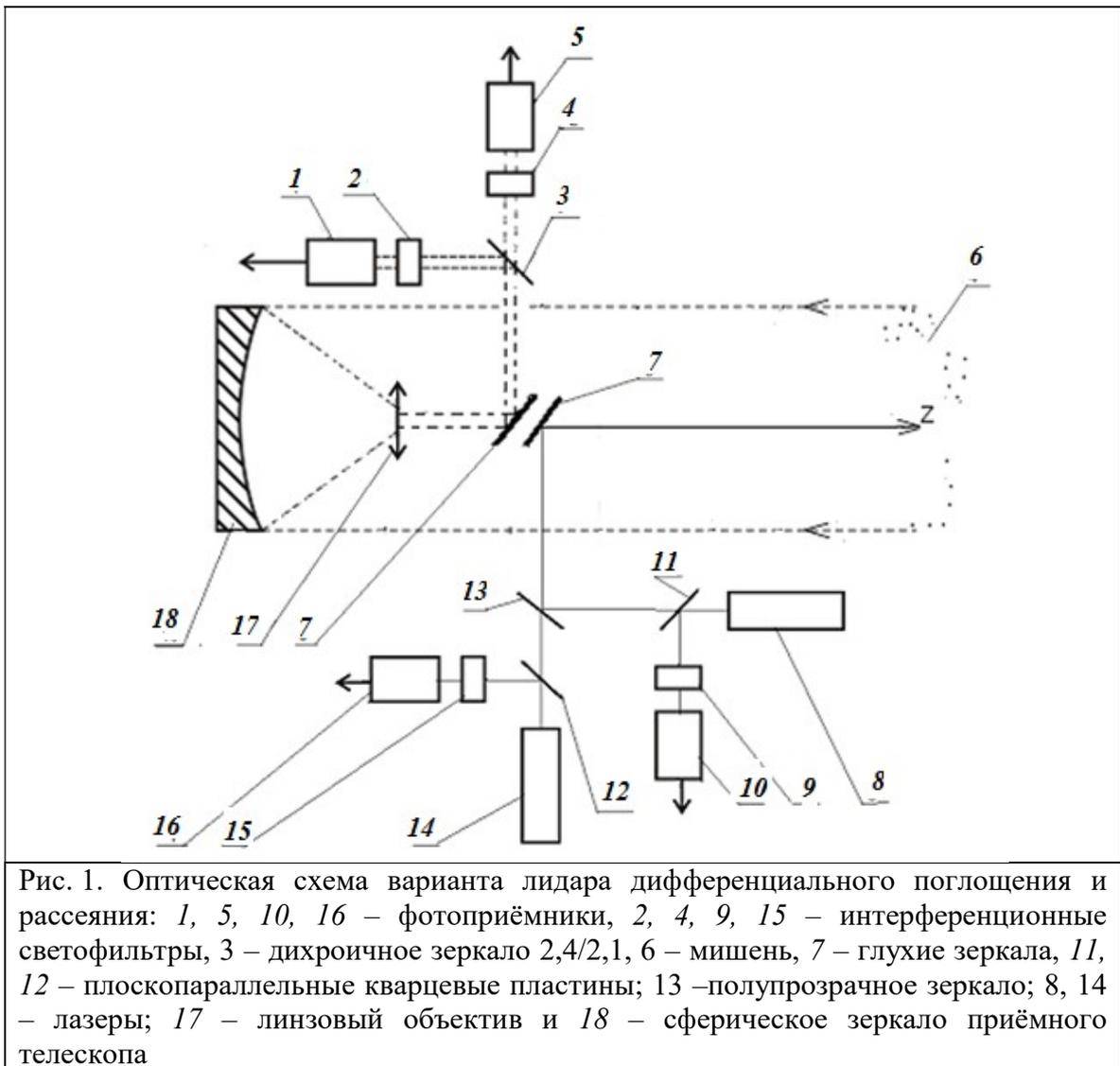
длине волны 2,4 мкм (или частоте $\nu_1 = 125 \text{ ТГц}$), которое попадает в максимум полосы поглощения молекул H_2 [38]. Его излучает параметрический генератор в ИК диапазоне, который накачивается излучением второй гармонике лазера на АИГ: Nd на длине волны 532 нм. Лазерное излучение вне этой полосы поглощения было взято на длине волны 2,1 мкм, чтобы попасть в область прозрачности атмосферы [33]. Для экспериментальной реализации такого варианта в качестве опорного канала в схеме дифференциального поглощения использовался импульсный твёрдотельный лазер на активном элементе YAG–Cr–Ho [43] (или частоте $\nu_2 = 142,9 \text{ ТГц}$).

Рассмотрим оптическую схему такого варианта лидара ДПР, приведённую на рис. 1.

Передающая система лидара состоит из двух лазеров 14 и 8, энергия лазерного излучения первого в импульсе длительностью 10 нс на длине волны 2,4 мкм (ν_1) равна 15 мДж, а второго – 40 мДж на длине волны 2,1 мкм (ν_2). Площадь приёмной апертуры телескопа $18 S_0 = 0,125 \text{ м}^2$.

Интенсивность лазерного излучения на длине волны 2,4 мкм, прошедшего сквозь слой атмосферы с молекулами водорода заданной концентрации туда и обратно, уменьшается за счёт поглощения в молекулярном водороде [16, 20] и через интерференционный светофильтр 2 направлялось на фотоприёмник 1. Одновременно дихроичным зеркалом 3

лазерное излучение на длине волны 2,1 мкм через интерференционный светофильтр 4 направлялось на фотоприёмник 5 для измерения его интенсивности. Оно также прошло сквозь толщю атмосферы и служило в качестве опорного сигнала в дифференциальной схеме измерения. Импульсы напряжений с двух одинаковых фотоприёмников 1 и 5 вводились в измерительную систему и записывались в ПК. Кварцевые пластины 11 и 12 отводили часть лазерного излучения на длинах волн 2,4 мкм и 2,1 мкм через светофильтры 9 и 15 на фотодиоды 10 и 16 для контроля энергии лазерных импульсов и синхронизации работы всего лидара. Кварцевая линза 17 использовалась для создания параллельного пучка из рассеянного излучения на обеих длинах волн.



Далее, оптические оси лазеров и приёмного телескопа направлены вдоль оси z [44]. Оптические характеристики атмосферы на трассе зондирования z зададим коэффициентом ослабления $k(\nu, z)$, а свойства топографической мишени – коэффициентом отражения или суммарным коэффициентом упругого рассеяния M_i и молекулярного рассеяния Рэлея $\rho(\pi, \nu)$ [19].

Следуя логике работ [35, 36], возьмем лидарные уравнения для упругого рассеяния на двух выбранных длинах волн и как в [62] разделим одно на другое.

Информация о концентрации молекул водорода содержится в множителе $T(\nu, z)$ в уравнении из [45], а коэффициент ослабления в атмосфере $k(\nu, z)$ определяется соотношением вида [34, 46]. Будем считать, что атмосфера однородна, и контур полосы поглощения молекул водорода аппроксимируем функцией Лоренца [19]. В итоге, как и ранее в [47], переходя к оптической плотности получим уравнение для ДПР в виде:

$$D = \ln \frac{P(\nu_2, z)}{P(\nu_1, z)} = \ln \left[\frac{E_2 G_2(z) \rho(\pi, \nu_2) \operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{\Gamma_1^2 + \Gamma_a^2}}{\sqrt{2\Gamma_a}} \right)}{E_1 G_1(z) \rho(\pi, \nu_1) \operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{\Gamma_2^2 + \Gamma_a^2}}{\sqrt{2\Gamma_a}} \right)} \sqrt{\frac{\Gamma_1^2 + \Gamma_a^2}{\Gamma_2^2 + \Gamma_a^2}} \right] - \{ -2k_0(\nu_2)z + 2k_0(\nu_1)z + \sigma_0(\nu_1) \int_0^z N(z') dz' \} \quad (1)$$

Таким образом, лидарное уравнение (1) позволяет найти концентрацию исследуемых молекул, если известны остальные параметры задачи. Значит, задавая диапазон искоемых концентраций молекул водорода, можно оценить параметры требуемого варианта лидара. Рассмотрим параметры этой задачи для нашей экспериментальной ситуации. Будем считать, что для нашего лидара $G_1(z) = G_2(z)$, а коэффициенты отражения $\rho(\pi, \nu)$ для обоих каналов примерно одинаковы и равны для суммарного упругого рассеяния в атмосфере – 10^{-7} [48]. Энергия $E = \tau P$ в импульсе длительностью 10 нс лазерного излучения на длине волны 2,4 мкм (ν_1) равна 15 мДж, а на длине волны 2,1 мкм (ν_2) – 20 мДж. Полуширины линий генерации двух лазеров Γ_1 и Γ_2 будут изменяться в диапазоне 1...5 ГГц. Будем считать, 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 [34] и равна 100 ГГц. Значения коэффициентов ослабления в атмосфере были взяты из [33] и равны соответственно $k(\nu_1) = 0,08 \text{ км}^{-1}$, $k(\nu_2) = 0,09 \text{ км}^{-1}$. Для полосы поглощения водорода максимальное значение сечения поглощения на длине волны 2,4 мкм по данным [20] $\sigma_0(\nu_1) = 0,8 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2$, а полуширина этой полосы – $\Gamma_3 = 45,5 \text{ ГГц}$ [20, 49].

Выполним численное решение уравнения (1) для значений полуширин Γ_1 и $\Gamma_2 = 2 \text{ ГГц}$, расстояний зондирования в диапазоне 10...1500 м, диапазона концентраций от 10^{11} см^{-3} до 10^{17} см^{-3} и приведённых выше остальных параметров задачи. Результаты решения уравнения (1) представлены на рис. 2 для приведённых выше параметров, диапазона концентраций $10^{11} \dots 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и расстояния зондирования до 1,5 км. Ограничение по величинам концентраций и расстояний связано с тем, что метод спектроскопии дифференциального поглощения [19, 40], имеет ограничения снизу и сверху на диапазон возможных значений произведений величин концентраций на толщины слоёв, которые определяются оптической схемой и фотоприёмником лидара. Для значений оптической плотности D больше 4,5 расчёты не проводились, так как динамический диапазон фотоприёмников был выбран, как и ранее 10^4 в соответствии с [34, 47].

Результаты решения уравнения (1) для той же ситуации, что на рис. 2, но для значений полуширины $\Gamma_1 = 5 \text{ ГГц}$ и $\Gamma_2 = 10 \text{ ГГц}$ и значения полуширины аппаратной функции $\Gamma_a = 100 \text{ ГГц}$ дают значения в 0,996 от полученных ранее на рис. 2. Это незначительное уменьшение оптической плотности связано с тем, что Γ_a значительно больше, чем Γ_1 и Γ_2 , т.е. их влияние на результат моделирования очень мало.

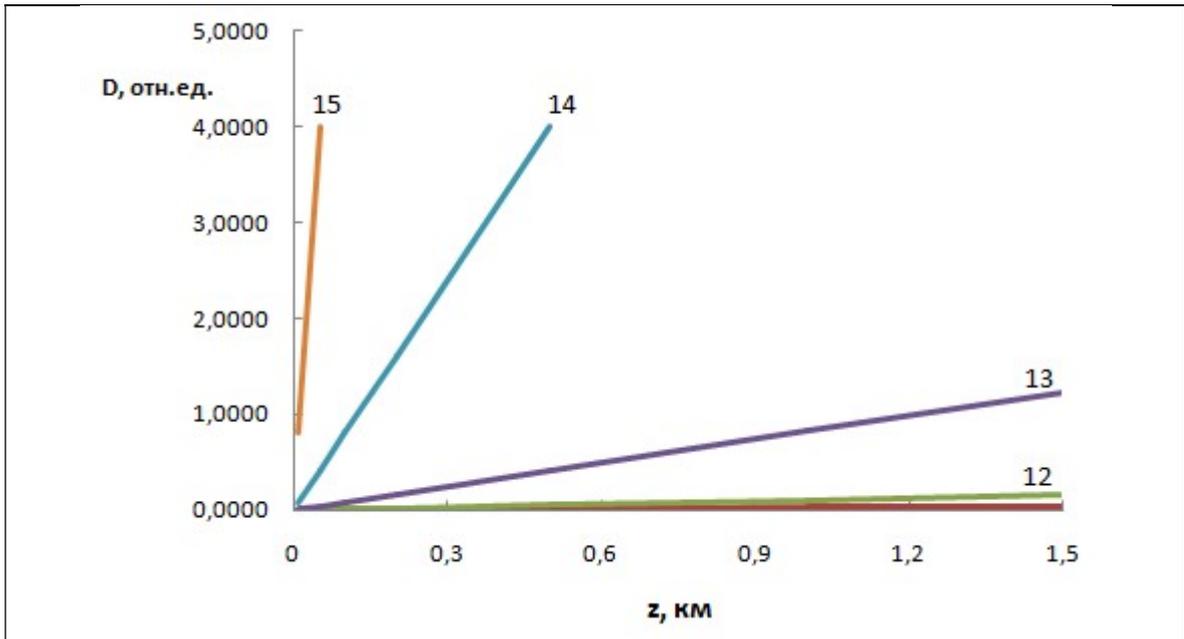


Рис. 2. Результаты численного решения уравнения (1) для диапазона концентраций $10^{11} \dots 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и значений полуширины Γ_1 и $\Gamma_2 = 1 \text{ ГГц}$

Далее выполним проверку полученных результатов. Для этого рассчитаем значение сечения поглощения молекул водорода для нашего лабораторного лидара дифференциального поглощения из [16, 20]. Полученный график зависимости оптической плотности D от концентрации молекул водорода N в слое толщиной 10 см представлен на рис. 3. Такая маленькая толщина слоя в 10 см связана с большими значениями концентрации водорода, которые получались из чистого водорода разбавлением до значений 10^{17} см^{-3} .

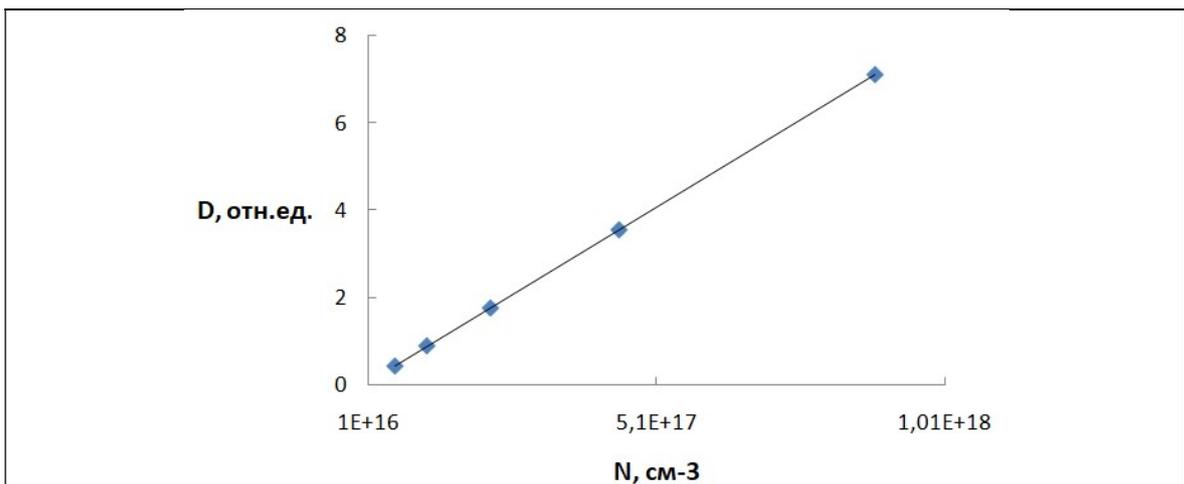


Рис. 3. График зависимости оптической плотности D от концентрации молекул водорода N в слое толщиной 10 см и равных значений полуширины Γ_1 и $\Gamma_2 = 2 \text{ ГГц}$

Обработка этого графика согласно [34] для значений полуширины $\Gamma_1 = 1$ и 5 ГГц и таких же двух значений полуширины $\Gamma_2 = 1$ и 5 ГГц позволила получить значение сечения резонансного поглощения молекул водорода на длине волны $2,4 \text{ мкм}$ равное $\sigma_0(\nu_1) =$

$(5,2 \pm 1,3) \cdot 10^{-18} \text{ см}^2$, которое оказалась в удовлетворительном согласии с полученным в работе [34, 50] значением $\sigma = 0,8 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2$.

Таким образом, показано, что учёт конечной ширины линии генерации лазера и аппаратной функции лидара при зондировании молекул водорода в атмосфере лидаром дифференциального поглощения и рассеяния проявляется в незначительном уменьшении оптической плотности при условии $\Gamma_a \gg \Gamma_1$ и Γ_2 . Поэтому решающим становится выбор полуширины интерференционных светофильтров при минимальной ширине линий генерации лазеров.

5.3 Зондирование водорода в атмосфере лидаром ДПР из космоса

Разработка новых дистанционных методов измерения концентрации молекул H_2 в атмосфере Земли на уровне порядка 10^{13} см^{-3} для их мониторинга с космической орбиты в рамках дистанционного зондирования Земли требует оценки возможностей лидарного мониторинга для решения таких задач. В работах [19, 34, 46, 47] был выполнен анализ методов лазерного зондирования молекул предельных углеводородов в атмосфере и получено, что лидар ДПР может использоваться для дистанционного измерения концентрации молекул на таком уровне. Однако представляет интерес теоретическая оценка возможностей такого лидара для мониторинга молекул водорода в атмосферном пограничном слое на уровне концентрации порядка 10^{13} см^{-3} и выше с космической орбиты в диапазоне высот от 100 км и вплоть до геостационарной орбиты.

Поэтому для выбора оптимальных параметров лидара ДПР для зондирования молекул водорода в атмосфере в режиме счёта фотонов с космической платформы на указанных высотах было выполнено численное решение лидарного уравнения для ДПР молекулами водорода для получения максимального значения сигнала лидара, соответствующего минимальной концентрации молекул.

Лидар ДПР для зондирования молекул водорода в атмосфере построен на базе моностатического лидара, у которого два лазерных луча распространяется вдоль оси приемного телескопа [34, 42]. Оптическая схема этого лидара приведена на рис. 1. В этом варианте лидара ДПР используется двухволновой излучатель на двух параметрических генераторах света с накачкой второй гармоникой одного YAG-Nd лазера на длине волны 532 нм. Одна длина волны лазерного излучения попадает в центр ИК полосы поглощения молекул водорода 2,4 мкм, а другая – вне этой полосы на длине волны 2,1 мкм [38] и обе с длительностью импульсов 10 нс и энергиями в импульсе до 1 мДж при частоте следования лазерных импульсов f до 100 кГц [34, 47]. Лазерное излучение двух параметрических генераторов света на длинах волн 2,4 и 2,1 мкм направляется вдоль оси приёмного телескопа перпендикулярно поверхности Земли.

Прошедшее через атмосферу зондирующее излучение на длине волны 2,4 мкм ослабляется за счёт поглощения исследуемыми молекулами водорода [19, 34, 38], а рассеянное аэрозолем и газовыми молекулами атмосферы назад излучение на этой длине волны и на длине волны 2,1 мкм собирается на космической платформе телескопом типа Ньютона.

На первом этапе для оценки величины сигнала рассеяния выполним численное решение лидарного уравнения для суммарного рассеяния M_i на аэрозольных частицах и молекулах газов в атмосфере в направлении назад в режиме синхронного счёта фотонов [46] для лазерного излучения на длине волны 2,4 мкм в виде:

$$n(z) = n_0 \cdot K_1 \cdot \Delta z \cdot G(z) \cdot f t \cdot S_0 \exp\left[-2 \int_0^z \alpha(\lambda, z') dz'\right] \rho / z^2 \quad (2)$$

Новой величиной в этом выражении является ρ – суммарный коэффициент обратного рассеяния в атмосфере, равный по данным [19] 10^{-7} . Будем рассматривать однократное рассеяние и однородную атмосферу [19, 34]. Мерой сигнала рассеяния будет длительность времени измерения t , которое выразим из уравнения (2) в виде

$$t = \frac{n(v, z)z^2}{BY_1(v, z)} \quad (3)$$

где лидарная константа $B = \frac{c\tau_L}{2} S_0 \frac{P_0}{\sqrt{2\pi}\Gamma}$ и функция $Y_1(v, z) = n_0(z)T^2(\lambda, z)\rho$. Остальные обозначения те же, что и в выражении (1).

Для нашей экспериментальной ситуации возьмем концентрацию молекул водорода в диапазоне $N(z) = 10^{11} \dots 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Значение максимума полосы валентных Н-Н колебаний молекул H_2 из [1, 16] равно 4161 см^{-1} или $2,4 \text{ мкм}$. В качестве опорного канала возьмем лазерное излучение второго лазера с длиной волны $2,1 \text{ мкм}$. Значения коэффициентов ослабления для этих длин волн $\alpha(\lambda_0, z)$ и $\alpha(\lambda_1, z)$ взяты из раздела 3 и равны соответственно $0,08 \text{ км}^{-1}$ и $0,09 \text{ км}^{-1}$. Для полосы поглощения водорода максимальное значение сечения

поглощения на длине волны $2,4 \text{ мкм}$ по данным [20] $\sigma_0(\nu_1) = 0,8 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2$, полуширина этой полосы – $\Gamma_3 = 45,5 \text{ ГГц}$ [34, 48], а лидарной константы $K_1 = 0,49$ были взяты как и в [34, 48]. Поперечное сечение зеркала приёмного телескопа лидара равно $0,13 \text{ м}^2$, а шаг по расстоянию выбирался от 100 м до 10 км в зависимости от уровня концентрации исследуемых молекул и высоты нахождения космического аппарата. При расчётах пропускания атмосферы на заданных длинах волн учитывалась зависимость величины коэффициента ослабления $\alpha(\lambda, z)$ от высоты z в соответствии с [33, С. 382] и рассмотренной в предыдущем разделе.

Рассмотрим численное решение уравнения (3) в предположении, что $G(z)$ для нашего случая равно 1, и за время измерения t будут зарегистрированы 200 фотонов. Зондирование молекул водорода производится с космического аппарата, находящегося как на геостационарной (или геосинхронной) орбите высотой 35786 км , так и с высоты орбиты 100 км для концентрации исследуемых молекул $N(z) = 10^{12} \text{ см}^{-3}$. Результаты решения уравнения (3) представлены на рис. 4.

Как следует из графика рис. 4 увеличение шага по расстоянию Δz в уравнении (3) на порядок приводит к пропорциональному увеличению времени измерения. Минимальное время измерения для высоты 100 км составит для шага по расстоянию 150 м почти 34 мс , а для шага 10 км – 165 мс , для высоты 600 км и шага 150 м – $1,23 \text{ с}$, а шага 10 км – почти 6 с при частоте следования лазерных импульсов 100 кГц . Для геостационарной орбиты с высотой 35786 км минимальное время измерения для шага по расстоянию 150 м равно 4430 с , а для шага 10 км – 21400 с или почти 6 ч .

Для оценки потенциальных возможностей такой системы дистанционного зондирования молекул водорода в атмосфере с космической платформы было выполнено численное решение лидарного уравнения для ДПР (1), которое рассмотрим в предположении о равенстве всех констант в виде [42]:

$$D = \ln \frac{P(\nu_2, z)}{P(\nu_1, z)} = 2\alpha(\nu_1)z - 2\alpha(\nu_2)z + 2\sigma_0(\nu_1) \int_0^z N(z') dz' \quad (4)$$

Все обозначения те же, что и в [45, 46]. Все величины определены для двух длин волн лазерного излучения λ_0 и λ_1 , причём вторая длина волны находится вне полосы поглощения исследуемых молекул водорода.

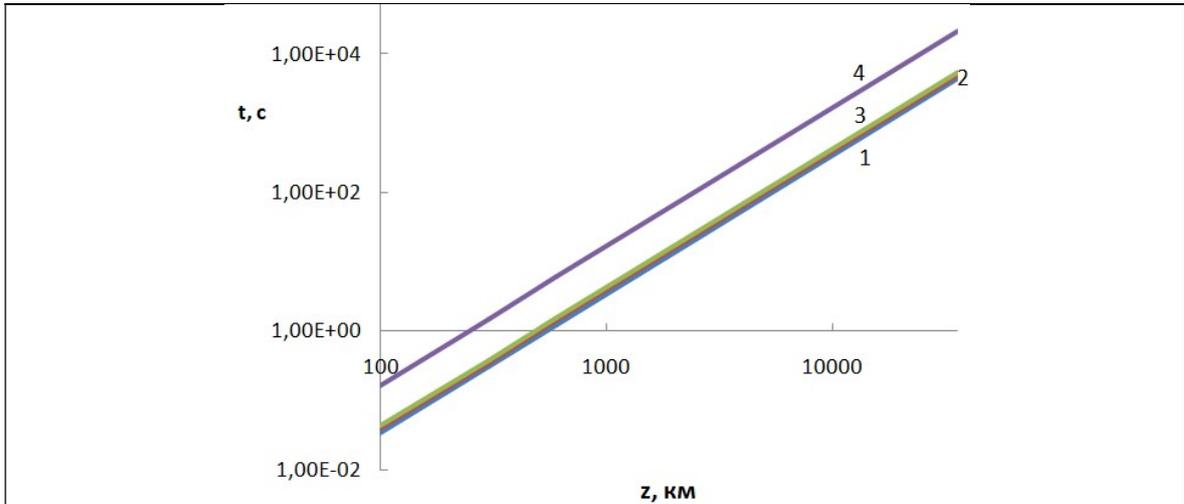


Рис. 4. Рассчитанная по уравнению (3) зависимость времени измерения t (в логарифмическом масштабе, в с) от высоты зондирования z (в логарифмическом масштабе, в км) для четырёх значений шага по расстоянию Δz : 150 м (1), 1 км (2), 1,5 км (3) и 10 км (4)

В общем случае оптическая плотность D при дифференциальном поглощении [34] определяется сечением резонансного поглощения σ_0 исследуемых молекул, их концентрацией $N(z)$ и толщиной поглощающего слоя атмосферы Δz . С другой стороны, эта оптическая плотность определяется логарифмом отношения лидарных сигналов или чисел фотонов на двух выбранных длинах волн согласно лидарному уравнению (1).

Используя те же самые значения параметров задачи, по уравнению (1) были выполнены расчёты времени измерения t лидаром ДПР для значения концентраций исследуемых молекул $N(z) = 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и диапазона высот от 100 до 36000 км с шагом по расстоянию Δz от 50 до 10000 м. Результаты расчетов приведены на рис. 5.

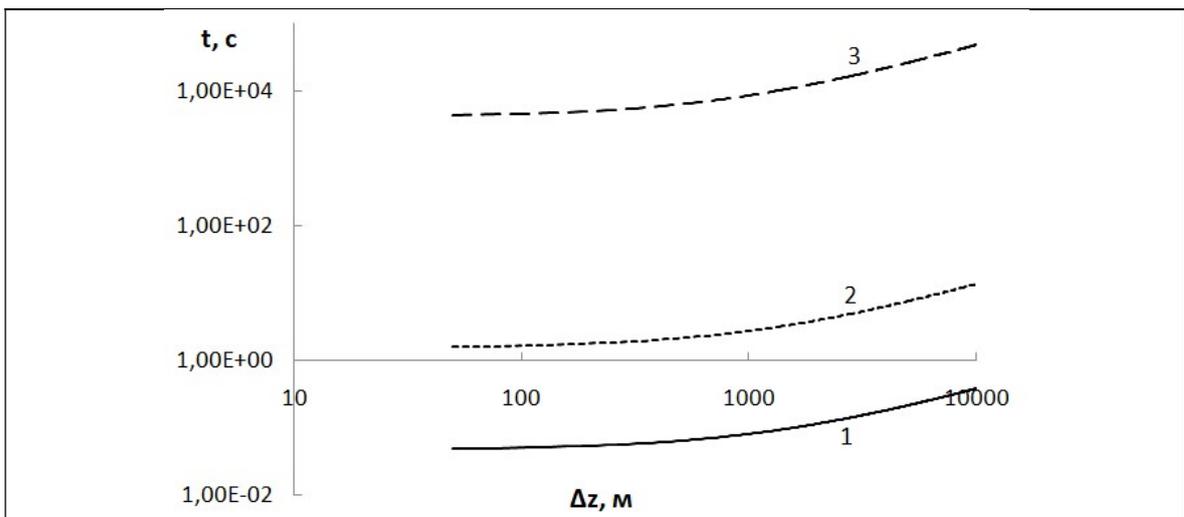
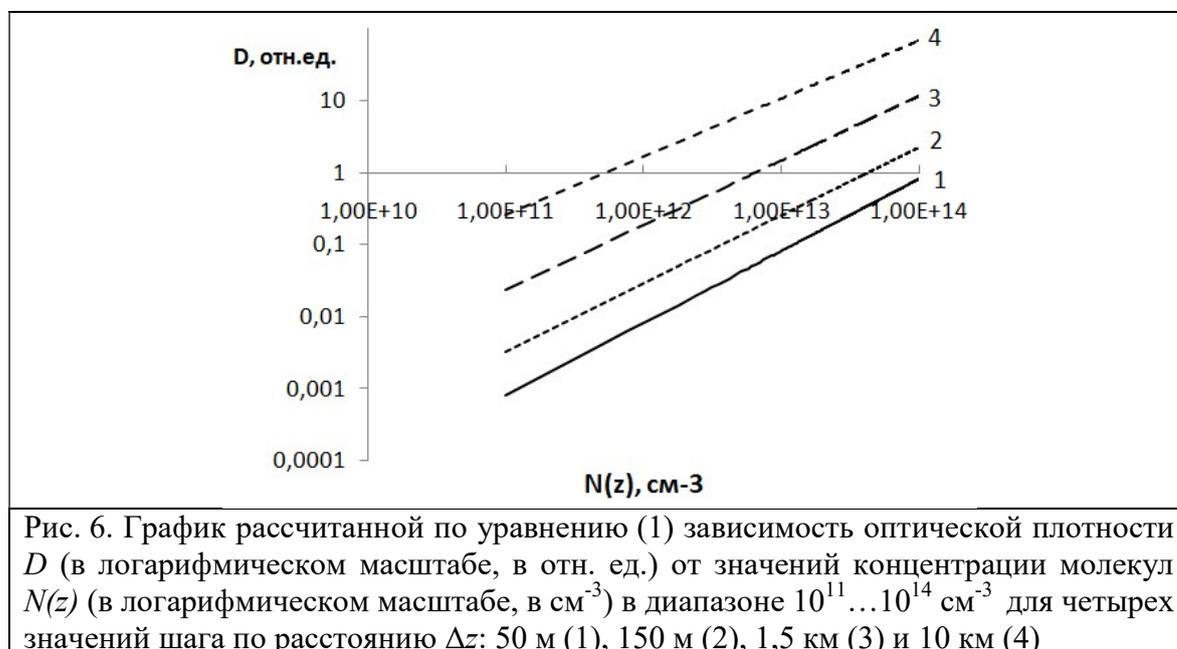


Рис. 5. Рассчитанная по уравнению (1) зависимость времени измерения t (в логарифмическом масштабе, в с) от значений шага по расстоянию Δz (в логарифмическом масштабе, в м) для трёх значений высоты зондирования z : 100 км (1), 600 км (2) и 36000 км (3)

Графики на рис. 5 показывает зависимость детектируемой лидаром концентрации молекул водорода от величины шага по высоте, причем для значения 10^{15} см^{-3} эта длина составляет около 1 м, но в то же время для концентрации 10^{11} см^{-3} длина трассы увеличивается почти до 10 км. Это связано с тем, что метод дифференциального поглощения имеет ограничения снизу и сверху на диапазон возможных значений произведений концентрации на толщину поглощающего слоя, определяемого временем одного измерения $t_1 = 2\Delta z/c$ [34]. Так как динамический диапазон фотоприемников ограничен [34], будем считать, что максимальное значение оптической плотности может быть равно двум. Для исследования зависимости оптической плотности D от величины шага по высоте Δz и уровня концентрации $N(z)$ были выполнены расчёты по уравнению (1) для значений оптической плотности в диапазоне $0,1 \dots 2$. На рис. 6 представлена зависимость оптической плотности в этом диапазоне значений шага по расстоянию Δz от уровня концентрации исследуемых молекул от 10^{11} см^{-3} до 10^{14} см^{-3} .



Анализ графика на рис. 6 показывает возможность регистрации сигнала с концентрацией молекул 10^{11} см^{-3} на трассах зондирования от 3,5 до 51 км, а если длина трассы постоянна и равна 10 км, то для тех же параметров лидара можно зарегистрировать уровни концентрации молекул водорода в диапазоне $2,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3} \dots 5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$, что подтверждается графиком на рис. 6.

Для оценки полученных результатов учтём перемещение космической платформы с лидаром. Эта платформа движется по круговой орбите со скоростью не менее 7,9 км/с. В то же время из-за вращения Земли поле зрения приёмного телескопа на её поверхности перемещается со скоростью 464 м/с. Тогда эта точка на поверхности переместится за время измерения на минимальное расстояние около 992,96 км для времени измерения 2140 с на геостационарной орбите. Кроме того, поле зрения приёмного телескопа с расходимостью приблизительно 10^{-3} будет выглядеть на земной поверхности как круг с диаметром 36 км. Поэтому максимальный измерительный объём за время регистрации для исследуемых молекул водорода будет равен $357465,6 \text{ км}^3$ для высоты столба атмосферы 10000 м.

Таким, образом, анализ полученных результатов показывает, что время измерения для уровня концентрации исследуемых молекул водорода 10^{13} см^{-3} на длине волны лазерного излучения 2,4 мкм и высоты от 100 до 36000 км лежит в диапазоне 0,165 с...2140 с или 35,5 мин для такого варианта лидара ДПР. Поэтому можно вести речь о регистрации таким лидаром с космической платформы концентрации исследуемых молекул водорода на уровне 10^{13} см^{-3} .

5.4 Зондирование молекул водорода лидаром КРС

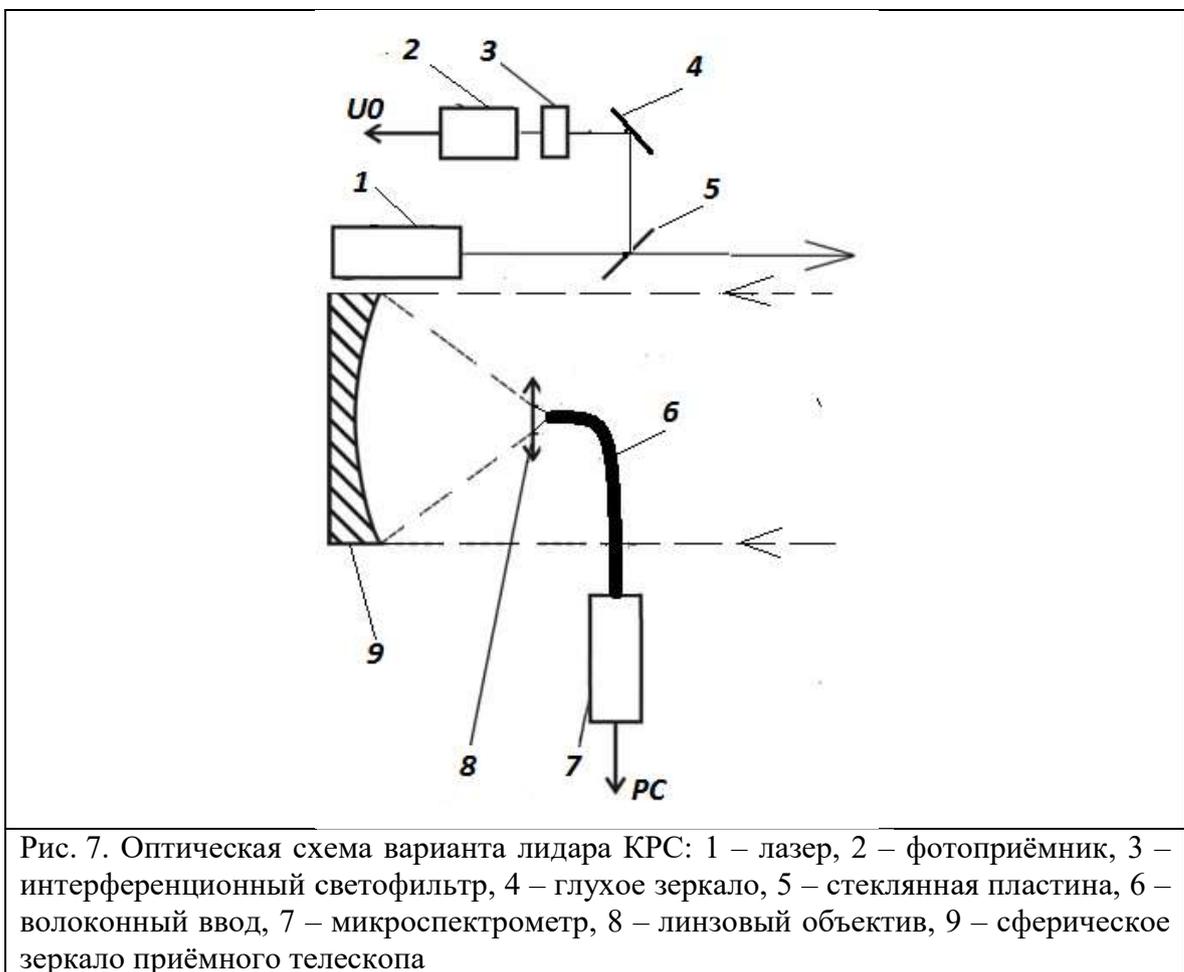
Разработка новых лазерных систем для измерения концентрации молекул водорода на уровне концентраций порядка 10^{13} см^{-3} и выше в атмосфере на базе лидара КРС требует выбора оптической схемы и оптимального подбора параметров отдельных элементов такого лидара. Ранее было получено, что лидар КРС может использоваться для дистанционного измерения концентрации молекул на таком уровне на расстояниях до сотен метров [51]. А в работах [45, 46] было предложено лидарное уравнение для комбинационного рассеяния света газовыми молекулами в атмосфере с учётом 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 [46].

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 счёта фотонов и выбор оптимальных параметров такого лидара.

Наряду с ДПР для обнаружения газовых молекул в атмосфере широкое распространение получил метод КРС молекулами в газовых потоках [52–54]. Поэтому наиболее вероятным представляется применение лидара комбинационного рассеяния света 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 [26, 55] лидар КРС для дистанционного измерения концентрации молекул водорода был изготовлен на базе моностатического лидара, лазерный луч которого распространяется вдоль оси приёмного телескопа (рис. 7) на некотором расстоянии. Это как раз биаксиальная схема и лазерный луч параллелен оси приёмного телескопа [16, 37, 38]. 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 [19, 56]. Излучение лазера I направлялось параллельно оси приёмного телескопа на расстоянии 150 мм, как и в [48, 56], а излучение КРС молекулами водорода в атмосфере в направлении назад собиралось приёмным телескопом типа Ньютона со сферическим зеркалом 9 диаметром 200 мм и фокусировалось линзовым объективом 8 в волоконный ввод 6 микроспектрометра 7, работающего на линии с ПК.

Часть лазерного излучения направлялась 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 [34, 48] 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 [44] было предложено лидарное уравнение для упругого рассеяния аэрозольными частицами в атмосфере в направлении назад с учётом конечной ширины линии излучения. А авторы [64] 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, приведённую на рис. 7. Обычно энергия или мощность импульса КРС исследуемыми молекулами регистрируемая лидаром мала и поэтому используется режим счёта фотонов [1, 16, 28]. 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 [44, 46]:

$$n(\nu, z) = n_0 \frac{c\tau_0}{2z^2} G(z) f t S_0 N(z) (d\sigma / d\Omega) \int_{\nu_0 - \Gamma_0}^{\nu_R + \Gamma_R} T_0(\nu_0, z) \cdot T(\nu_R, z) \cdot \Phi(\nu) A(\nu) d\nu \quad (5)$$

где $n(\nu, z)$ – число фотонов, зарегистрированное фотоприемником лидара на частоте ν_R комбинационного рассеяния света 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 [26]. Функцию распределения фотонов лазерного излучения в линии генерации [28, 39] в нашем случае будем считать Гауссовой, а аппаратную функцию или спектральный коэффициент пропускания приемной системы лидара $A(\nu)$ [19, 34, 46] 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 [48], а $\xi(\nu_R)$ – относительная спектральная чувствительность фотоприёмника на частоте ν_R излучения КРС взята из [57]. Перепишем уравнение (5) в виде

$$t = \frac{n(\nu, z) z^2}{BY(\nu, z) N(z)} \quad (5^*)$$

$$B = \frac{c\tau_L}{2} S_0 \frac{P_0}{\sqrt{2\pi}\Gamma}$$

где лидарная константа B и функция

$$Y(\nu, z) = 0,82 n_0 f G(z) \Gamma_0 K_1 \xi(\nu_R) \frac{d\sigma}{d\Omega} \exp\left[-\int_0^z \{\alpha(\nu_0, r) + \alpha(\nu_R, r)\} dr\right] \quad (6)$$

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 [44]. Выразим из уравнения (5) время измерения t как меру эффективности лидарной системы и рассмотрим концентрационную зависимость решения этого уравнения

$$N(z) = \frac{n(\nu, z) z^2}{BY(\nu, z) t} \quad (7)$$

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 [19, 34].

В работе [49] были выполнены лабораторные лидарные эксперименты для измерения дифференциального сечения КРС молекулами водорода. Решение лидарного уравнения для КРС типа (5) 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 равно $(4,3 \pm 0,9) \cdot 10^{-30} \text{ см}^2/\text{ср}$, что хорошо согласуется с данными для длины волны 337 нм $8,7 \cdot 10^{-30} \text{ см}^2/\text{ср}$ [19]. 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.

Используя это значение дифференциального сечения КРС молекулами H_2 , выполним компьютерное моделирование лидарного уравнения (5) для описанного выше варианта лидара КРС с биаксиальной [16, 30, 38] оптической схемой как на рис. 7. 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 [19, 58]. Излучение лазера I направлялось параллельно оси приёмного телескопа на расстоянии 150 мм, как и в [19, 44], а излучение КРС молекулами водорода в атмосфере в направлении назад собиралось приёмным телескопом типа Ньютона со сферическим зеркалом 9 диаметром 200 мм и фокусировалось линзовым объективом 8 в волоконный ввод микроспектрометра FSD-8 6, который работал на линии с ПК.

Будем рассматривать однократное комбинационное рассеяние света и однородную атмосферу [19, 34, 60]. Значения максимума полосы валентных Н-Н колебаний молекул водорода равно 4161 см^{-1} по данным [1, 16, 19, 30] и для всех длин волн лазерного излучения были рассчитаны длины волн полос колебательного комбинационного рассеяния света молекулами водорода, приведённые в таблице 2.

Значения дифференциальных сечений комбинационного рассеяния света для всех молекул ($d\sigma/d\Omega$) и всех выбранных длин волн лазерного излучения были определены по данным, экспериментально измеренным в [19, 37] при комнатной температуре и нормальном давлении на длине волны излучения 532 нм и для интересующих нас длин волн рассчитаны с учётом зависимости $1/\lambda^4$ [30]. Все эти значения приведены в таблице 2. Значения коэффициентов ослабления для этих частот $\alpha(v_0, z)$ и $\alpha(v_R, z)$ из [15] также собраны в таблице 1. Поперечное сечение зеркала приёмного телескопа лидаера было $0,031 \text{ м}^2$. а шаг по расстоянию – 7,5 м для времени одного измерения 50 нс.

Таблица 2

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

Длина волны, λ , нм	Частота, ν , ГГц	Дифференциальное сечение КРС ($d\sigma/d\Omega$) $10^{30} \text{ см}^2/\text{ср}$	Коэффициент ослабления $\alpha(v_0, r)$, км^{-1}	Коэффициент ослабления $\alpha(v_R, r)$, км^{-1}	Относительная спектральная чувствительность фотоприемника $\xi(\nu)$
H_2		4161 см^{-1}			
355	845,1	11,08	0,33		
416,5	720,3			0,24	0,61
532	563,9	$4,3 \pm 0,9 - 21\%$	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 inaba	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 (6), полагая, что $G(z)$ в нашем случае равно 1, и концентрация молекул водорода – в диапазоне $N(z) = 10^{13} \dots 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Для нашей экспериментальной ситуации за время измерения t может быть зарегистрировано 200 фотонов [40].

Для этого случая выполним решение уравнения (6) 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 м до 1500 м. Результаты решения уравнения (6) для этого случая представлены на рис. 8 как зависимость времени измерения t для нашей экспериментальной ситуации от расстояния зондирования z .

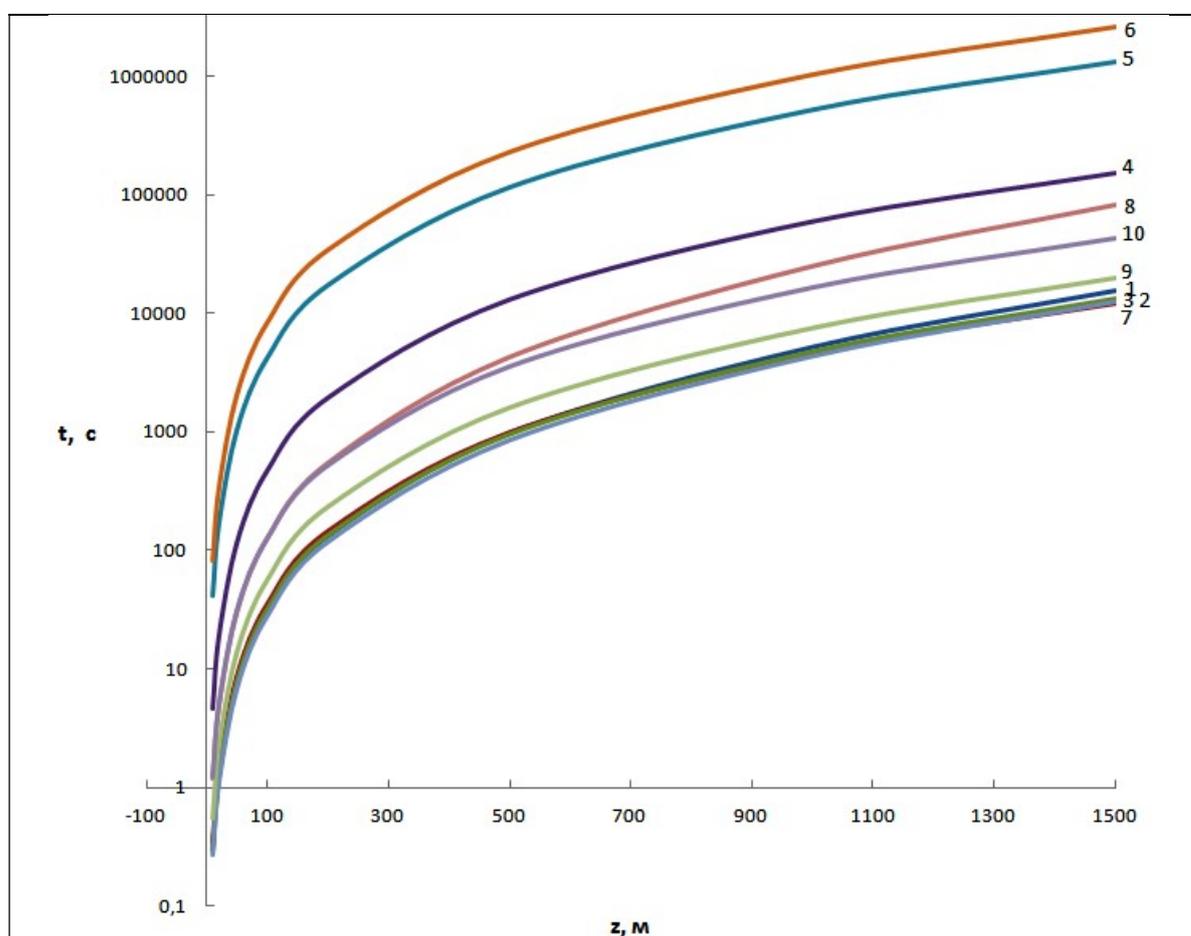


Рис. 8. Графики рассчитанной по уравнению (6) логарифмической зависимости времени измерения t для молекул водорода с концентрацией $N(z) = 10^{13} \text{ см}^{-3}$ (в с) от расстояния зондирования z (в м) для длин волн лазерного излучения 532(2), 377(7), 405(3), 355(1), 510(9) 589(10), 308(8), 650(4),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

На графиках рис. 8 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 (6), 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. 9.

В этом случае на рис. 9 все кривые удаётся различить и уточнить, что для больших расстояний порядка 1000 м наименьшее время измерения получается для длины волны 532 нм.

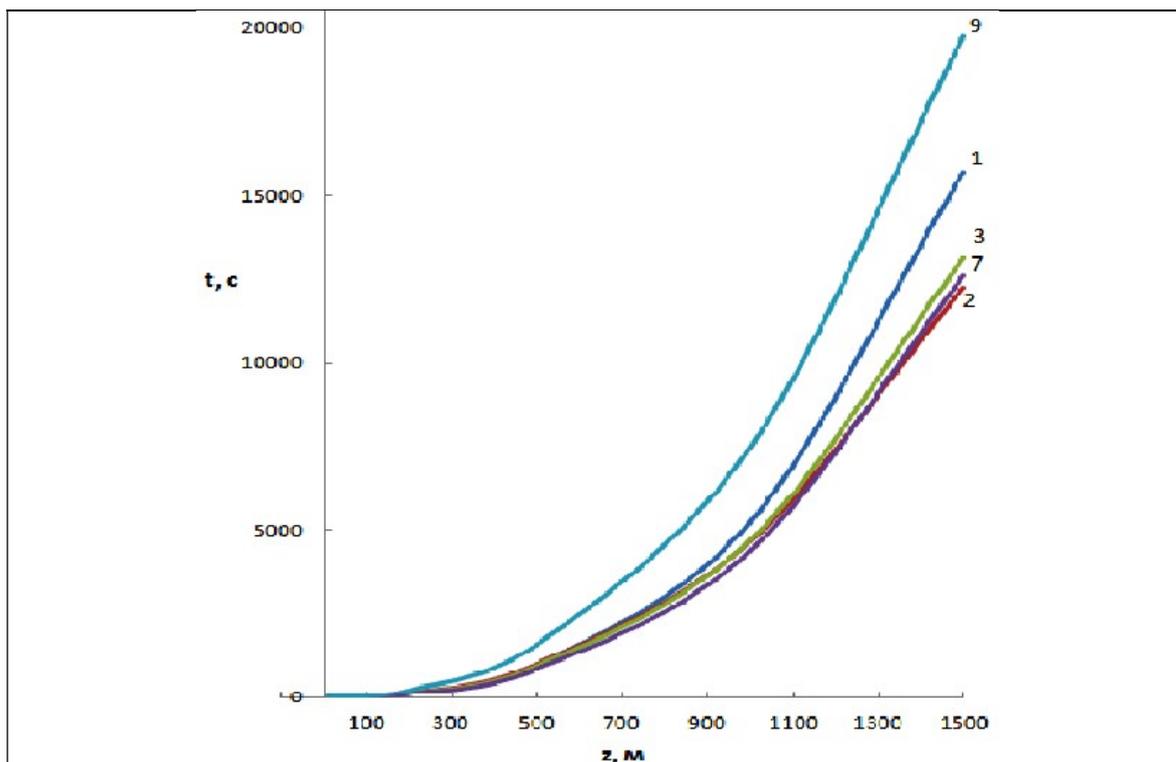


Рис. 9. Графики рассчитанной по уравнению (5.6) зависимости времени измерения t (в с) от расстояния зондирования z (в м) для длин волн лазерного излучения 532(2), 377(7), 405(3), 355(1) и 510(9) нм для тех же экспериментальных условий

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 (7), величину $N(z)$. Рассмотрим численное решение уравнения (7) 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. 9. Результаты решения уравнения (7) представлены на рис. 10.

Как видно из графиков рис. 10 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 фотоприёмника 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 фотоприёмника. Очевидно, что дальнейшее уменьшение величины концентрации исследуемых молекул возможно за счёт увеличения частоты следования лазерных импульсов f или увеличения их энергии E_0 .

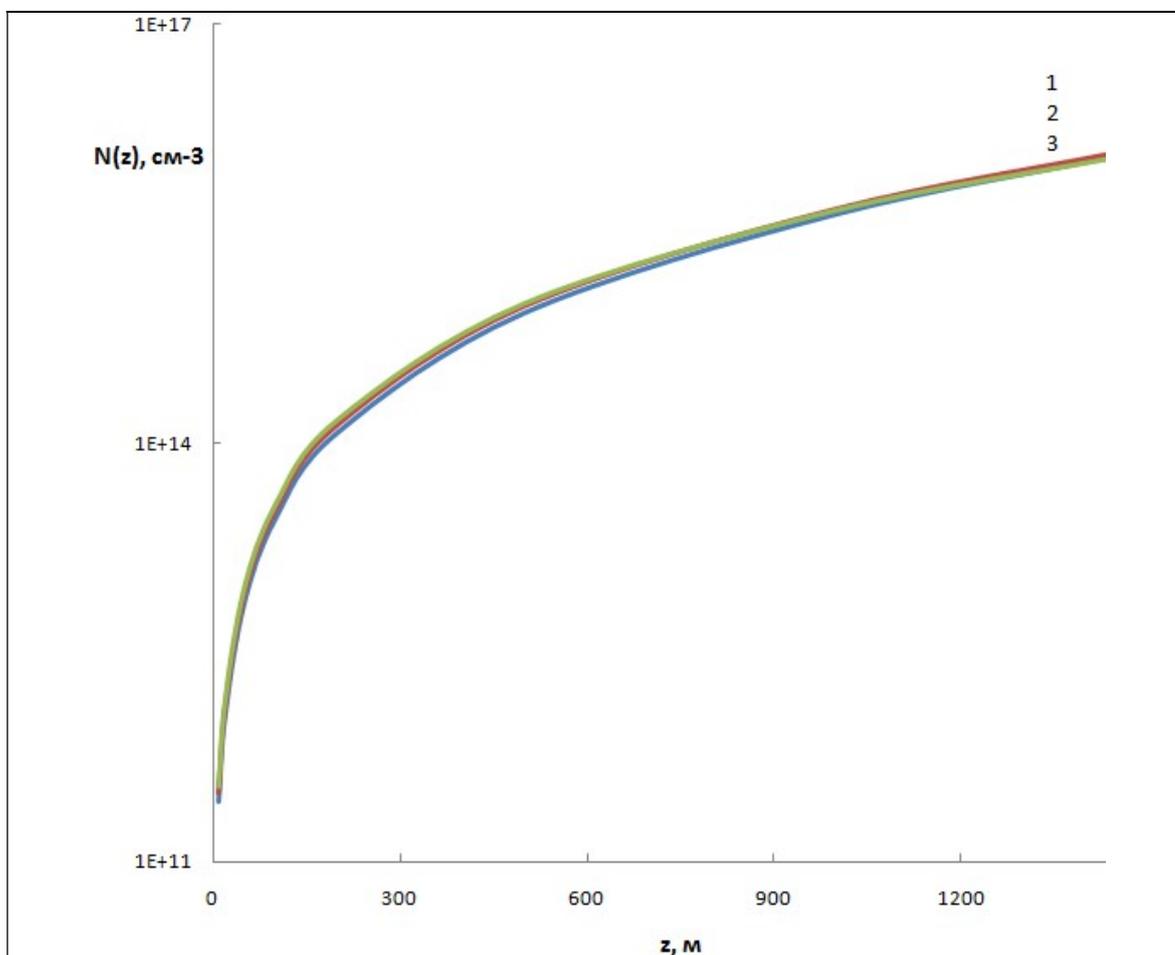


Рис. 10. Графики рассчитанной по уравнению (7) логарифмической зависимости концентрации молекул водорода $N(z)$ (в см^{-3}) от расстояния зондирования z (в м) для одного и того же времени измерения $t = 10$ с для длин волн лазерного излучения 377(1), 405(2) и 532 (3) нм для той же самой экспериментальной ситуации

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 [54]. 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 [34, 48, 60]. 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.

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 отойдёт 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, применение лидарной диагностики позволит обнаруживать и бороться с лесными пожарами, которые могут возникать или подпитываться выходами водорода на поверхность Земли.

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 наших работах было экспериментально измерено дифференциальное сечение комбинационного рассеяния ($d\sigma/d\Omega$) 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 позволяет найти диапазон концентраций исследуемых молекул по результатам оценки параметров требуемого лидара. Выполненный анализ результатов зондирования молекул водорода в атмосфере с уровнем концентрации молекул порядка 10^{13} см^{-3} с космической орбиты показывает возможность выбора оптимального варианта лидара ДПР для высоты от 100 до 36000 км.

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.

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. С. Лобанов. Водород. Назад в будущее. // Наука. Политех. 2021, № 3 С. 44–45.
2. Вернадский В. И. Избранные сочинения. Том 4. Кн. 2 / Москва: Издательство Академии наук СССР. 1960. С. 13–14.
3. Ларин В. Н. Наша Земля. Происхождение, состав, строение и развитие изначально гидридной Земли. М.: Агар. 2005. 248 с.
4. Портнов А. Вулканы – месторождения водорода. // Промышленные ведомости 2010 с. 10–12.
5. Григорьев С. А., Погребский В. И., Фатеев В. Н. и др. Получение водорода электролизом воды: ...» Транспорт на альтернативной основе 2008, № 3, 3.
6. В. Болдырев «Водородная энергетика» Промышленные ведомости 2006, № 5.
7. Привалов В. Е. Патент России № 165752, БИ № 31, 2016.
8. Привалов В. Е. Патент России №180441, БИ № 17, 2018.
9. Привалов В. Е. Устройство для разложения воды. // Труды XXVIМежд. Конференции «Лазерно-информационные технологии – 2018». Новороссийск, 2018. С. 40–41.
10. Meyer Stanley A. US Patent № 4826581. 1989.
11. Meyer S. A. The Birthday of new technology. Water fuel cell, Technical brief, Hydrogen fracturing process. – Grove City, Ohio, 1995. Режим доступа: свободный (13.11.2018), https://vk.com/doc72110428_365553645?hash=cf3a3a09bfb78824b9&dl=23e8b23c85441b4472
12. Dubinin A. M., Fink A. V., Kagarmanov G. R. Optimization of operating parameters of endothermic generators with electric heating of retort // Metal Science and Heat Treatment. 2009. Режим доступа: свободный (13.11.2018) <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11041-009-9174-0>
13. Ushakov V. Y. Electrical Power Engineering. Current State, Problems and Perspectives. 2018. TPU. Springer International Publishing AG. 2018. Режим доступа: свободный (13.11.2018) http://portal.tpu.ru/files/personal/ushakov/electrical_power_engineering1.pdf
14. Роговая М. Водород: перспективы энергетического перехода // Журнал "Коммерсантъ Наука" №23 / Коммерсантъ 24 июня 2021 г. <https://zen.yandex.ru/media/kommersant/vodorod-perspektivy-energeticheskogo-perehoda-60d49ea701c59234cb830a0b>
15. Hydrogen fracturing. Режим доступа: свободный (13.11.2018) <https://www.scopus.com/home.uri?zone=header&origin=searchbasic>
15. Hydrogen fracturing. Режим доступа: свободный (13.11.2018) <https://www.scopus.com/home.uri?zone=header&origin=searchbasic>
16. Vanags M., Kleperis J., Bajars G. Water electrolysis with inductive voltage pulses. // INTECH, 2012, Режим доступа: свободный 13.11.2018 http://cdn.intechopen.com/pdfs/40142/InTechWater_electrolysis_with_inductive_voltage_pulses.pdf
17. Crabtree G. W., Dresselhaus M. S., Buchanan M. V. The Hydrogen Economy. 2004. Режим доступа: свободный (13.11.2018) <http://saeta.physics.hmc.edu/courses/p80/papers/hydrogen/PhysToday%20Hydrogen%20041239.pdf>
18. Воронина Э. И., Привалов В. Е., Шеманин В. Г. Зондирование молекул водорода на лабораторном лидаре КР. // Письма в Журнал технической физики. 2004. Т. 30. вып. 5. С. 14–17.

19. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. М. Мир. 1987. 550 с.
20. Зуев В. Е., Кауль Б. В., Самохвалов И. В., Кирков К. И., Цанев В. И. Лазерное зондирование промышленных аэрозолей. Новосибирск: Наука. 1986. 186 с.
21. Gibson A. J., Sanford M. C. W. Daytime measurement of the atmospheric sodium layer // *Nature*. 1972. V. 239. No. 2. P. 509–511.
22. Byer R. L. Remote air pollution measurement // *Optical and Quantum Electronics*. 1975. V. 7. No. 1. P. 147–177.
23. Аршинов Ю. Ф., Бобровников С. М., Шумский В. К., Попов А. Г., Сериков И. Б. Дистанционное определение состава, скорости истечения и температуры выбросов из труб предприятий КР –лидаром // *Оптика атмосферы*. 1992. Т. 5. N 7. С. 726–733.
24. Hochenbleicher J. G., Kiefer W., Brandmuller J. A laboratory study for resonance Raman lidar system // *Appl. Spectroscopy*. 1976. V. 30. No. 2. P. 528–531.
25. Fouche D. G., Chang R. K. Relative Raman cross-section for O₂, CH₄, C₂H₆, NO, NO₂ and H₂ // *Appl. Phys. Lett.* 1972. V. 20. No. 2. P. 256–257.
26. Inaba H., Kobayasi T. Laser-Raman radar // *Opto - electronics*. 1972. V. 4. No. 1. P. 101–123.
27. Merfi S. H., Lawrence J. D. Jr., McCormik M. P. Observation of Raman scattering by water vapour in the atmosphere // *Appl. Phys. Lett.* 1969. V. 15. No. 2. P. 295–297.
28. Murray E. R., Hake R. D. Jr., Van der Laan J. E., Hawley J. G. Atmospheric water vapour measurement with a 10 micrometer DIAL system // *Appl. Phys. Lett.* 1976. V. 28. No. 4. P. 542–543.
29. А. В. Горбунов, Е. Е. Мухин, А. В. Скрылев и др. Измерение концентрации водорода методом лазерной индуцированной флуоресценции. // *Conference Paper 2017*. <https://www.researchgate.net/publication/315109364>
30. She C. Y. Remote measurement of atmospheric parameters: new applications of physics with lasers // *Contemporary Physics*. 1990. V. 31. No. 4. P. 247–260.
31. Жильцов В. И., Козинцев В. И., Константинов Б. А., Никифоров В. Г. Лидары для контроля параметров атмосферы // *Электронная промышленность*. 1983. No. 7. С. 3–7.
32. Poultney S. K. Laser radar studies of upper atmosphere dust layer // *Space Research*. 1972. V. 12. No. 3. P. 403–421.
33. Справочник по лазерам. Под ред. Прохорова А. М. Т. 1. М.: Советское радио. 1978. 504 с.
34. Привалов В. Е., Фотиади А. Э., Шеманин В. Г. Лазеры и экологический мониторинг атмосферы. СПб.: Лань, 2013. 288 с.
35. Бронштейн Д. Л., Александров Н. Н. Современные средства измерения загрязнения атмосферы. Л. : Гидрометеиздат, 1989. С. 97–98.
36. Измерения в промышленности : справ. В 3 кн. Кн. 2 / Под ред. П. Профоса. М. : Металлургия, 1990. 344 с.
37. Лазерный контроль атмосферы. Под ред. Э. Д. Хинкли. М.:Мир, 1979. 416 с.
38. Привалов В. Е., Шеманин В. Г. Оптимизация лидара дифференциального поглощения и рассеяния для зондирования молекулярного водорода в атмосфере. // *Журнал технической физики*. 1999. Т. 69. Вып. 8. С. 65–68.
39. В. Г. Шеманин, В. Е. Привалов. Измерение концентрации молекул водорода в атмосфере: компьютерное моделирование лидарного уравнения для дифференциального поглощения и рассеяния // *Измерительная техника*. 2022. № 11. С. 38–43. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-11-38-43>
40. Зуев В. В., Катаев М. Ю., Макогон М. М., Мицель А. А. Лидарный метод дифференциального поглощения. Современное состояние исследований. // *Оптика атмосферы и океана*. 1995. Т. 8. № 8.

41. Воронина Э. И., Привалов В. Е., Шеманин В. Г. Лидарное зондирование молекул йода при низких давлениях // *Оптика и спектроскопия*. 2002. Т. 93. № 4.
42. Привалов В. Е., Шеманин В. Г. Параметры лидара дифференциального поглощения для обнаружения молекулярного йода в атмосфере // *Оптический журнал*. 1999. Т. 66. № 2. С. 40–42.
43. Sigimoto N., Sims N., Chan K., Killinger D. K. // *Optics Lett.* 1990. V. 15. No. 8. P. 302–304.
44. Привалов В. Е., Шеманин В. Г. Уравнение лазерного зондирования для реального аэрозольного лидара // *Фотоника*. 2013. № 2(38), С. 72–78.
45. Privalov V. E., Shemanin V. G. The Lidar Equation Solution Depending on the Laser Radiation Line Width Studies // *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*. 2013. V. 22, No. 4. P. 244–249. DOI: 10.3103/S1060992X13040073
46. Привалов В. Е., Шеманин В. Г. Лидарное уравнение с учетом конечной ширины линии генерации лазера // *Известия РАН. Серия Физическая*. 2015. Т. 79. № 2. С. 170–180.
47. Привалов В. Е., Шеманин В. Г. Мониторинг молекул сероводорода в атмосферном пограничном слое лидаром дифференциального поглощения и рассеяния из космоса. // *Оптический журнал*. 2018. Т. 85. Вып. 4. С. 49–52.
48. 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.
49. V. E. Privalov, V. G. Shemanin. 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*
50. Privalov V. E., Shemanin V. G. // *Proceedings of SPIE*. 2002. Vol. 4900. P. 78–82.
51. V. E. Privalov, V. G. Shemanin. Raman lidar system for the hydrogen molecules remote sensing in atmosphere // *Optics and Spectroscopy, 2022, Vol. 132, No. 3, P. 363–367. DOI: 10.21883/OS.2022.03.52168.2707-21*
52. Привалов В. Е., Шеманин В. Г. Оптимизация лидара дифференциального поглощения и рассеяния для зондирования молекулярного водорода в атмосфере // *ЖТФ*. 999. Т. 69. No. 8. С. 65–68.
53. Privalov V. E., Shemanin V. G. Hydrogen and iodine molecules lidar monitoring in atmosphere // *Proceedings of SPIE*. 2000. V. 4064. P. 2–11.
54. Привалов В. Е., Смирнов В. Б., Шеманин В. Г. Расчёт параметров лазерного дистанционного зондирования молекулярного водорода. // *Препринт НИИ «Российский центр лазерной физики» СПбГУ. СПб., 1998. 20 с.*
55. Privalov V. E., Shemanin V. G. Hydrogen Sulfide Molecules Lidar Sensing in the Atmosphere // *Optical Memory and Neural Networks*. 2018. V. 27. No. 2, P. 120–131. DOI: 10.3103/S1060992X18020091
56. Privalov V. E., Shemanin V. G. Accuracy of lidar measurements of the concentration of hydrofluoride molecules in the atmospheric boundary layer // *Measurement Techniques*. 2020. V. 63. No. 7. P. 543–548. DOI 10.1007/s11018-020-01821-0
57. <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)
58. Глазов Г. Н. Статистические вопросы лидарного зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1987. 308 с.
59. Долгих Г. И., Привалов В. Е. Лазеры. Лазерные системы. Владивосток: Изд. Дальнаука, 2009. 202 с.
60. Донченко В. А., Кабанов М. В., Кауль Б. В., Самохвалов И. В. Атмосферная электрооптика. Томск: Изд-во НТЛ. 2010. С. 178–181

Lasers and Energy

*¹ V. E. Privalov, ² V. G. Shemanin.

¹ *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 195251, Russia, St. Petersburg*

² *Branch of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov in Novorossiysk, 353912, Russia, Novorossiysk, Myskhakskoe Highway 75*

Energy development ensures scientific and technological progress. Expanding the prospects for the use of hydrogen as a new type of environmentally friendly fuel requires the creation of systems to control its emissions and leaks from storage tanks and pipelines. However, remote control and measurement of the concentrations of hydrogen molecules is a big problem. The review considers methods and instruments for laser remote sensing of hydrogen molecules in the atmosphere. Collected, systematized and refined all previously published results. The potential possibilities of lidar sounding methods are considered. A computer simulation of the operating modes of modern lidars for laser monitoring of hydrogen in the atmosphere has been performed. The results of modeling specific experiments on remote measurement of the concentration of hydrogen molecules in the atmosphere are presented, and extensive reference material is given.

Key words: energetics, hydrogen molecule, lidar, laser, monitoring, concentration, measurement time, probing distance.