

В.В. Колосов, А.В. Кузиковский

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМООПТИЧЕСКОЙ
ГЕНЕРАЦИИ ЗВУКА В АТМОСФЕРЕ

Теоретически и экспериментально исследовано явление генерации звука в атмосфере при ее нагреве амплитудно-модулированным лазерным пучком. Подтверждены предсказанные возможности измерения эффективного диаметра пучка и коэффициента поглощения атмосферы. Результаты исследования поля коэффициента поглощения на длине волны 10,6 мкм указывают на его существенную пространственно-временную изменчивость, складывающуюся из относительно быстрых флуктуаций с временем корреляции ~ 1 с, более медленных вариаций на масштабах порядка минут и часов, и изменений, явно обусловленных оптической погодой. Атмосфера после выпадения дождя, например, характеризуется относительно низким средним уровнем поглощения. Полученные результаты дают основания полагать, что аэрозоль несет ответственность за обнаруженные в работе сильные флуктуации поля поглощения.

Тепловое расширение среды в канале распространения лазерного излучения является хорошо изученной стороной самосогласованного процесса теплового самовоздействия. В связи с приложениями обычно обсуждаются оптические проявления, а материальные уравнения задачи рассматриваются как вспомогательные. Но задолго до появления лазеров было замечено, что измеримые изменения параметров среды под влиянием света возникают еще до того, как может быть замечено обратное влияние среды на характеристики светового пучка. Это наглядно демонстрируется пневматическим приемником Голея, регистрирующим излучение по изменению давления в ячейке с поглощающим газом. Именно давление, в отличие от плотности и температуры, легче всего измерить. Следует также отметить, что при измерениях в свободном пространстве можно говорить только о переменной составляющей давления, то есть об акустическом сигнале.

Поскольку акустический сигнал обусловлен временными изменениями интенсивности пучка, то при непрерывном режиме излучения акустический отклик возникает только как реакция на стадии включения и выключения, на которые обычно приходится относительно мало энергии. Целесообразно поэтому периодически повторять операции включения и выключения, то есть ввести амплитудную модуляцию. При этом синусоидальная модуляция, очевидно, предпочтительнее прямоугольной, так как «неустановившаяся стадия» в этом случае существует постоянно. Ниже показано, что немаловажен и выбор частоты модуляции.

В акустическом сигнале содержится информация о важнейших параметрах задачи теплового самовоздействия: коэффициенте поглощения среды и геометрии пучка. Исследованию возможности извлечения этой информации в условиях реальной атмосферы и посвящена данная работа.

Для изменения давления можно записать известное уравнение

$$\partial^2 p / \partial t^2 - u^2 \Delta p = \alpha(\gamma - 1) \partial I / \partial t, \quad (1)$$

где u — скорость звука; α — коэффициент поглощения излучения; γ — показатель адиабаты; I — интенсивность излучения.

Если пучок гауссов и промодулирован по амплитуде функцией $f(t)$:

$$I = (\pi a^2)^{-1} W \exp(-r^2/a^2) f(t), \quad (2)$$

то решение уравнения (1) может быть представлено в виде

$$p(r, t) = \int_0^{\infty} \hat{p}(z, t) J_0(z, r) z dz, \quad (3)$$

где

$$\hat{p}(z, t) = (2\pi a u)^{-1} z (\gamma - 1) W e^{-z^2/4} \int_0^{\bar{t}} \cos[z(\bar{t} - \bar{\tau})] f(\bar{\tau}) d\bar{\tau};$$

I_0 — функция Бесселя нулевого порядка; $\bar{t} = tu/a$.

Для $f_1(t) = H(t)$ — импульс включения — получаем следующие решения:

$$p_1(0, \bar{t}) = (\pi au)^{-1\alpha} (\gamma - 1) W \bar{t} e^{-\bar{t}^2} {}_1F_1(0,5; 1,5; -\bar{t}^2);$$

$$p_1(r \gg 1, \bar{t}) = (4\pi au)^{-1\alpha} (\gamma - 1) W (\pi \bar{r}/2)^{-1/2} \{(\bar{t} - \bar{r}) \Gamma(3/4) \times {}_1F_1(0,75; 1,5; -(\bar{t} - \bar{r})^2) + \\ + 0,5 \Gamma(1/4) {}_1F_1(0,25; 0,5; -(\bar{t} - \bar{r})^2)\}, \bar{r} = r/a.$$

Решение на оси пучка совпадает с приведенным в [1]. Данные решения представлены на рис. 1. Максимальные значения давления при этом равны

$$p_{1\max}(r = 0) = 0,54 (\pi au)^{-1\alpha} (\gamma - 1) W,$$

$$p_{2\max}(r \gg a) = 0,43 (\pi au)^{-1\alpha} (\gamma - 1) W \sqrt{a/r}.$$

Для $f_2(t) = \frac{E}{W} \delta(t)$ (то есть длительность импульса $\tau \ll a/u$) получаем решение

$$p_2(0, \bar{t}) = \alpha (\gamma - 1) (\pi a^2)^{-1} E {}_1F_1(1; 0,5; -\bar{t}^2),$$

которое представлено на рис. 1.

Изменение давления в дальней зоне ($r \gg a$) при импульсном воздействии излучения описано в работе [2].

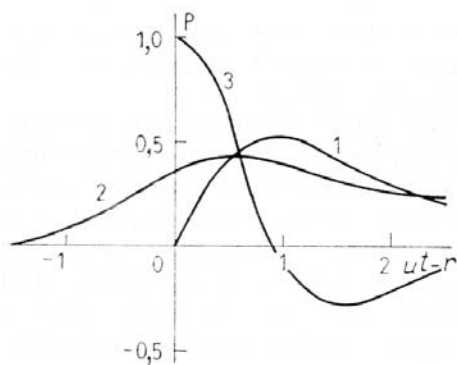


Рис. 1. Решения акустического уравнения (1) для функций $f(t)$ вида: 1 - $f(t) = H(t)$, $r=0$; 2 - $f(t) = H(t)$, $r \gg a$; 3 - $f(t) = \delta(t)$, $r = 0$

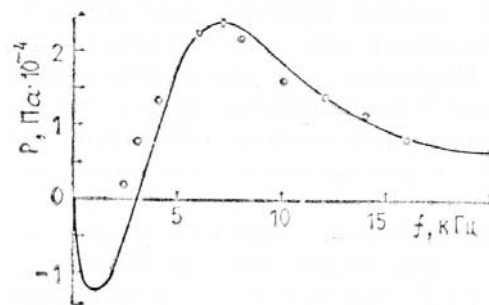


Рис. 2. Зависимость амплитуды акустического сигнала от частоты модуляции. Сплошная кривая - расчет, точки - данные эксперимента

Для $f_3(t) = H(t)(1 + \sin \omega t)$ получена частотная зависимость амплитуды периодической составляющей акустического сигнала на оси пучка, представленная на рис. 2. Резонансные значения давления равны

$$p_{3+}^+(r = 0) = 0,45 (\pi au)^{-1\alpha} (\gamma - 1) W;$$

$$p_{3-}^-(r = 0) = -0,25 (\pi au)^{-1\alpha} (\gamma - 1) W.$$

Амплитуда звука максимальна на чистоте

$$f_{\max} = 0,45u/a.$$

С расстоянием давление падает по закону

$$p(r) = p(r=0) \sqrt{a/r}.$$

Схема натурального стенда приведена на рис. 3. Пучок гауссова профиля и фиксированной мощности 550 Вт в телескопе подвергается амплитудной модуляции с контролируемой частотой и дважды проходит через исследуемую трассу. Средняя высота трассы над подстилающей поверхностью ≈ 7 м. Приемный микрофон располагался на дистанции ≈ 25 см от оси пучка. В канале акустических измерений использовалась стандартная аппаратура для исследования шума, дополненная селективным активным перестраиваемым фильтром с добротностью ~ 100 , детектором с постоянной времени 0,05 с и осциллографами с синхронизацией развертки от модулятора пучка.

Результаты исследования зависимости амплитуды акустического сигнала от частоты модуляции приведены на рис. 2. Для частот ниже 4 кГц характерен акустический шум типа дробового эффекта. Поэтому на каждой частоте регистрировалась серия реализаций, полученных путем усреднения по ансамблю выравненных по фазе синхросигнала ~ 50 выборок сигнала, содержащих 4–5 периодов. Затем отбиралась реализация с наилучшим отношением сигнал/шум. В соответствии с методикой, отклонения от расчетной кривой определяются флуктуациями поглощения. Измеренная на рабочей частоте 6 кГц относительная дисперсия этих флуктуации в данном случае равна 0,08. Поскольку вся характеристика «амплитуда–частота» снималась в течение ~ 30 мин, всякий раз при переходе на новую частоту на рабочей частоте контролировалась стабильность оптико-акустической ситуации. Резонансный характер амплитудно-частотной характеристики, как видно, хорошо выражен. Исходя из $f_{\max} \approx 6$ кГц, получаем $a = 2,13$ см, что хорошо совпадает с данными прямых измерений. Определенное по амплитуде звукового давления значение коэффициента поглощения в данном случае равно $1,9 \cdot 10^{-6} \text{ см}^{-1}$.

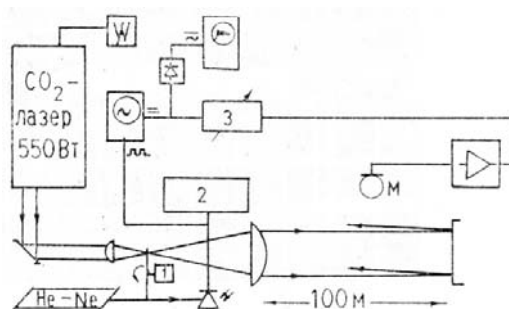


Рис. 3. Схема натурного стенда: 1 – модулятор; 2 – частотомер; 3 – перестраиваемый фильтр

Существование резонанса приводит к тому, что генерируется практически чистый тон, промодулированный по амплитуде некоторым медленно меняющимся сигналом (рис. 4), что вызвано изменчивостью поля поглощения. Отмечены медленные вариации поглощения, никак не связанные с изменением температуры и влажности. Так, в связи с двукратным падением сигнала в одночасовой серии измерений было отмечено только изменение солнечной освещенности. Зафиксировано заметное уменьшение акустического сигнала после выпадения дождя.

Относительно флуктуации с временем корреляции ~ 1 с отмечено (это видно и из приведенных осциллограмм), что с падением среднего уровня сигнала флуктуации обычно возрастают. Дисперсия флуктуации сравнима со средним уровнем (рис. 4,б), причем подобные реализации более типичны, чем «спокойная» реализация, представленная на рис. 4,а. Расчетное значение коэффициента поглощения углекислым газом и водяным паром па частоте линии P(20) для условий, в которых, например, получена реализация, представленная на рис. 4,б, равно $0,165 \text{ км}^{-1}$ [3]. Это значение, как видно, неплохо согласуется с характерным уровнем сигнала в данной реализации.

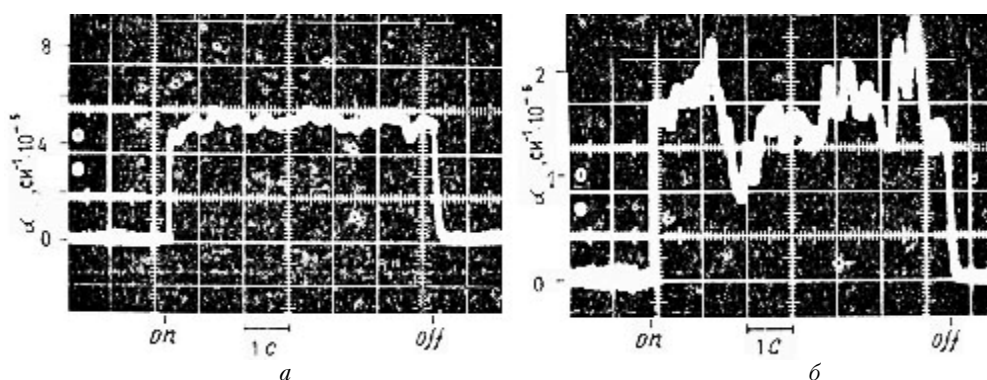


Рис. 4. Зависимость амплитуды акустического сигнала, представленной в единицах коэффициента поглощения, от времени. Детектор с постоянной времени $\sim 0,05$ с. Интервал измерения: *on* – включение CO₂-лазера; *off* – выключение. Примеры (а) слабых, (б) сильных флуктуации коэффициента поглощения, наблюдаемых при $t = +10^\circ\text{C}$, относительной влажности 42%, метеорологической дальности видимости ≈ 10 км

На основании полученных результатов можно заключить, что предсказанные возможности метода термооптической генерации звука для определения размера пучка и коэффициента поглощения в атмосфере хорошо реализуются. Но для атмосферной нелинейной оптики не менее

существенный интерес представляют отмеченные выше сильные флуктуации коэффициента поглощения. С точки зрения нелинейных искажений эти флуктуации являются одним из определяющих факторов ухудшения когерентности пучков при тепловом самовоздействии в атмосфере.

Хотя метод не разделяет аэрозольную и газовую составляющие экстинкции, разумно считать, что именно аэрозоль ответствен за отмеченные флуктуации.

Следует также отметить, что хорошая локальность и пассивность данного метода измерений ставит его вне конкуренции для последующего детального излучения пространственно-временной структуры поля поглощения атмосферы.

1. Зуев В. Е. Распространение лазерного излучения в атмосфере, М.: Радио и связь 1981.
2. Джидтоев М. С., Попов В. К., Платоненко В. Т., Чугунов А. В. Зависимость параметров оптоакустического сигнала от радиуса возбуждаемой области. — Квантовая электроника, 1984, т. 11, № 2, с. 414.
3. Mc Coy J. H., Rensch D. B., Long R. K. Water Vapor Continuum Absorption of Carbon Dioxide Laser Radiation near 10 μ . — Appl. Opt., 1969, v. 8, p. 1471.

Институт оптики атмосферы
СО АН СССР, Томск

Поступила в редакцию
22 сентября 1987 г.

V. V. Kolosov, A. V. Kuzikovskii. Investigation of Sound Thermo-optical Generation in the Atmosphere.

The sound generation in the atmosphere by the amplitude modulated laser beam heating was theoretically and experimentally investigated. The predicted possibilities of measuring the effective diameter of a beam and the absorption coefficient of the atmosphere have been confirmed. The results of investigating the absorption coefficient field at the wave length, of 10.6 μm indicates its essential space-time variability caused by relatively quick fluctuations with the time correlation ~ 1 s, more slowly variations in the scales of the order of minutes and hours, and the changes explicitly resulted from optical weather. The atmosphere after the rain is characterized, for example, by a relatively low mean absorption level and weak fluctuations. Although the method does not distinguish the aerosol and gas absorptions, the data obtained enable one to assume the responsibility of the aerosol for the absorption field fluctuations in the spectral range of 10.6 μm .