

А.И. Жуков, Д.Я. Ковалевский, М.А. Федоров

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ ТЕПЛОВОГО САМОВОЗДЕЙСТВИЯ ПУЧКА ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЕСТЕСТВЕННОЙ АТМОСФЕРЕ

Приведены результаты экспериментов по измерению ослабления непрерывного оптического излучения в естественной незамутненной атмосфере на приземной трассе. Анализ полученных данных свидетельствует о наличии дополнительного по сравнению с молекулярным поглощением ослабления пучка, которое можно объяснить как проявление его теплового самовоздействия.

1. Введение

В октябре 1964 г., 31 год назад, в журнале «Applied Physics Letters» была опубликована первая экспериментальная работа [1], посвященная тепловому расплыванию пучка излучения, распространяющегося в поглощающей среде. Это был эксперимент с пучком гелий-неонового лазера, в резонатор которого помещались кюветы с различными жидкостями. Авторы [1] использовали обнаруженное явление для измерения малых по величине показателей поглощения излучения в жидкостях, продемонстрировав тем самым одну из возможностей его практического применения. В последующие годы этот эффект – один из многих эффектов самовоздействия пучков оптического излучения, активно исследовался преимущественно в связи с его отрицательным влиянием на характеристики пучков излучения, распространяющегося на длинных атмосферных трассах.

Большинство экспериментов по исследованию теплового самовоздействия пучков оптического излучения выполнены в лабораторных условиях [1–4]. В этих работах сообщается об экспериментах, проведенных с лазерным пучком в естественной атмосфере. В [5] пучок на трассе длиной 195 м пропусклся через специальную емкость, моделирующую наличие безветренной зоны на участке трассы. Почти одновременно проводились измерения средней интенсивности пучка в фокальной плоскости в отсутствие емкости на трассе. Результаты указывают на наличие тепловых искажений пучка: средняя интенсивность в фокусе при наличии на трассе безветренной зоны в два раза меньше интенсивности при ее отсутствии.

В фокальной плоскости пучка CO₂-лазера на трассе 760 м наблюдалось эллипсоидальное распределение интенсивности [6]. Однако результаты этого эксперимента трудно объяснить как тепловую дефокусировку пучка, поскольку эксперимент проводился при мощности пучка ≈ 1 кВт и низком содержании водяного пара в воздухе 5 г/м³. В [7] представлены результаты исследований влияния атмосферной трассы и участка между источником и оптической системой на дефокусировку лазерного пучка в условиях теплового самовоздействия.

В настоящей работе представлены результаты экспериментов по исследованию ослабления интенсивности пучка непрерывного оптического излучения длиной волны 10,6 мкм на приземной трассе длиной 1500 м в естественной атмосфере в широком диапазоне метеословий. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что в проведенных экспериментах наблюдалось тепловое самовоздействие пучка излучения.

2. Методика проведения и результаты экспериментов

Использованная нами методика экспериментального определения показателей ослабления в атмосфере пучка оптического излучения основывалась на измерении и сравнении значений максимальной интенсивности излучения в фокальной плоскости пучков, распространяющихся по измерительной и опорной трассам [8]. Измерительная трасса длиной 1500 м проходила в естественной атмосфере над ровной подстилающей поверхностью на высоте около 10 м. В

качестве опорной трассы, при распространении по которой влияние атмосферы было минимальным, использовалась либо короткая трасса длиной 275 м, либо та же измерительная трасса при метеоусловиях, соответствующих наибольшей прозрачности атмосферы.

Экспериментальный стенд включал источник и систему формирования пучка излучения, аппаратуру измерения параметров излучения и метеопараметров атмосферы. В качестве источника излучения использовался CO₂-лазер технологического типа. Излучение генерировалось одиночными импульсами длительностью несколько секунд. Формирование пучка и фокусировка его на измерительные позиции осуществлялись телескопом с фокусным расстоянием, регулируемым в диапазоне 200 – 2000 м. Пучок на входе в атмосферу имел кольцеобразную форму при коэффициенте затенения ≈0,4.

На входе пучка в атмосферу производилось измерение его мощности с помощью измерителя проходного типа. В фокальной плоскости пучка в конце трассы распространения измерялось распределение плотности мощности по его поперечному сечению с помощью измерителя матричного типа, представляющего собой квадратную матрицу размером 42×42 см с 49 измерительными ячейками размером 6×6 см. Результаты математической обработки этих данных позволяли с требуемой точностью восстанавливать распределение мощности по сечению пучка в телесном угле, под которым была видна измерительная матрица с выходного поста, и измерять максимальное значение интенсивности в фокальной плоскости пучка.

Из всей совокупности пусков излучения на атмосферных трассах для обработки были выбраны те из них, которые проводились в максимально контролируемых условиях при безотказной работе измерительных средств и при стабильной работе генератора излучения.

Одновременно с измерениями параметров излучения производилось измерение стандартных параметров атмосферы, скорости и направления ветра, метеорологической дальности видимости и структурной характеристики показателя преломления воздуха.

Экспериментально определялись две величины – показатель молекулярного поглощения излучения в атмосфере α_m и показатель суммарного ослабления пучка излучения в атмосфере α_c .

Показатель молекулярного поглощения излучения определялся косвенным методом: рассчитывался на основе экспериментальных значений метеопараметров с помощью соотношения [9, 10]

$$\alpha_m = 0,86 \cdot 10^{-3} \exp(1800(1/T - 1/296))(P_{H_2O} + 2,3)P_{H_2O} + 0,0757(296/T)^{3/2} \exp(2233(1/T - 1/296)), \quad (1)$$

где T – температура воздуха, К; P_{H_2O} – содержание водяного пара в атмосфере, Торр. В проведенных экспериментах диапазон изменения температуры воздуха и содержания водяного пара составлял от 3 до 21°C и от 5 до 19 г/м³ соответственно.

Измерение показателя суммарного ослабления пучка излучения было основано на измерении значений максимальной интенсивности излучения в фокальной плоскости пучков, распространяющихся по измерительной и опорной трассам. В этой методике α_c определялось из выражения

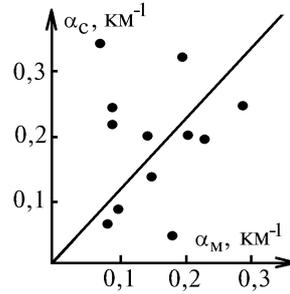
$$\alpha_c = \frac{1}{Z_{из}} \left[\ln \left(\frac{I_{оп} P_{из}}{I_{из} P_{оп}} \right) - 2 \ln \left(\frac{Z_{из}}{Z_{оп}} \right) + \alpha_{оп} Z_{оп} \right], \quad (2)$$

в котором через I , P и Z обозначены максимальная интенсивность излучения в фокальной плоскости пучка, выходная мощность пучка и длина трассы соответственно для измерительной и опорной трасс через индексы «из» и «оп». Для величины $\alpha_{оп}$ использовалось значение α_m , определяемое по формуле (1).

Оценка величин аэрозольной и турбулентной составляющих прозрачности атмосферы, проведенная по метео данным атмосферы по общепринятым методикам [4], показала, что аэрозольной и турбулентной составляющими ослабления пучка в атмосфере можно было пренебречь по сравнению с молекулярным поглощением. Метеорологическая дальность видимости при проведении экспериментов составляла 10–30 км, а структурная характеристика показателя преломления воздуха находилась в диапазоне $(0,3–8,0) \cdot 10^{-16} \text{ см}^{-2/3}$.

На рисунке представлены результаты измерения показателей суммарного ослабления интенсивности пучка излучения в зависимости от показателей молекулярного поглощения излучения. Сплошная прямая линия представляет собой уравнение регрессии, связывающее эти величины. Угловым коэффициентом наклона линии регрессии равен 1,1. Таким образом, значе-

ния показателей суммарного ослабления излучения превышают значения показателей молекулярного поглощения. Анализ и оценка возможных причин этого различия в показателях суммарного ослабления и молекулярного поглощения показывают, что наблюдаемое дополнительное ослабление пучка можно объяснить только его тепловым самовоздействием.



3. Сравнение экспериментальных результатов с теорией

Для сравнения полученных экспериментальных результатов с теорией была выбрана модель теплового самовоздействия гауссовского сфокусированного пучка, распространяющегося в условиях однородного постоянного горизонтального ветра, что соответствовало условиям проведения экспериментов в степном районе на берегу моря. В указанной модели относительное изменение показателя ослабления пучка излучения в режиме длинного импульса описывается выражением [11, 12]

$$\frac{\alpha_c - \alpha_m}{\alpha_m} = \tilde{N}_0 G_0 \left(1 + \frac{\pi \sqrt{\pi} r_0 \Phi_{ст}}{3 \ln 3 v_{\perp} \sqrt{1 + 3F^2} \Phi_{нст}} \right)^{-1}, \quad (3)$$

в котором t – длительность импульса излучения; r_0 – радиус пучка по уровню $1/e$; v_{\perp} – поперечная составляющая скорости ветра; $F = kr_0^2/z_F$ – число Френеля; z_F – фокусное расстояние; k – волновое число, а параметры \tilde{N}_0 и G_0 характеризуют зависимость величины теплового самовоздействия пучка от метеоусловий на трассе и параметров пучка на входе в атмосферу.

$$\tilde{N}_0 = \frac{(n_0 - 1)(\gamma - 1)P_0 z_F}{2\sqrt{\pi} n_0 \gamma p v_{\perp} r_0^3}; \quad (4)$$

$$G_0 = \frac{\pi F^2}{3\sqrt{1 + 3F^2}} \left(1 - \frac{6F}{\pi(1 + 3F^2)} \ln \frac{1 + 3F^2}{eF} \right) \exp\left(\frac{-\tau F}{0,6 + F}\right).$$

В этих формулах n_0 и γ – показатели преломления и адиабаты воздуха; p – атмосферное давление; P_0 – выходная мощность пучка; $\tau = \alpha_m z_F$ – оптическая толщина. Функции $\Phi_{ст}(F, \tau)$ и $\Phi_{нст}(F, \tau)$ определены в [12], а их значения близки к единице в области параметров F и τ , фигурирующих в настоящей статье. Поэтому для сопоставления теории с экспериментом было выбрано выражение (3), в котором принято $\Phi_{ст}/\Phi_{нст} = 1$.

При сравнении экспериментальных результатов с теорией необходимо учитывать связь между параметрами пучка, использованного в эксперименте, и параметрами пучка, теоретически моделирующего эксперимент. Эта связь устанавливалась с помощью выбора двух параметров модельного пучка – его радиуса и эффективного числа Френеля, которое характеризовало реальную расходимость пучка.

Радиус модельного пучка выбирался исходя из требования равенства его и среднего радиуса реального пучка, которые рассчитывались как средние по мощности, что означает выполнение равенства

$$\iint_s dx dy (x^2 + y^2) I(x, y) = \iint_{-\infty}^{+\infty} dx dy (x^2 + y^2) \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{r_0^2}\right),$$

в котором интеграл в левой части берется по выходной апертуре пучка. Отсюда получается соотношение $r_0 = R \sqrt{(1 + \varepsilon^2)/2}$, где R – внешний радиус кольцевой апертуры; ε – коэффициент затенения апертуры.

Учет реальной расходимости пучка, обусловленной его частичной когерентностью, осуществляется заменой числа Френеля, входящего в формулы (3) и (4), на эффективное число Френеля, которое определялось экспериментально при пусках излучения по опорной трассе.

Статистическая обработка результатов расчета показателей суммарного ослабления пучка излучения с использованием соотношения (3) на основе экспериментальных данных привела к следующей регрессионной связи: $\alpha_c = 1,35\alpha_m$. Этот результат уточняет аналогичное соотношение, приведенное в [13, 14], и, как и в этих работах, показывает, что для достижения соответствия между теорией и экспериментом необходимо соотношение (3) уточнить введением дополнительного коэффициента $\gamma_\phi < 1$, величина которого оказывается равной 0,28,

$$\frac{\alpha_c - \alpha_m}{\alpha_m} = \gamma_\phi \tilde{N}_0 G_0 \left(1 + \frac{\pi \sqrt{p} r_0}{3 \ln 3 t_{\perp} \sqrt{1 + 3 F^2}} \right)^{-1}.$$

Необходимость введения этого коэффициента можно объяснить подфокусировкой пучка за счет того, что его начальное распределение мощности имеет «провал» вблизи оси пучка [11].

4. Заключение

Особенность выполненной работы заключается в том, что эксперименты проводились в естественных условиях, соответствовавших максимальному проявлению исследуемого эффекта теплового самовоздействия пучка – большие влажности воздуха и МДВ, без применения методов масштабирования указанного эффекта, таких как подмешивание сильно поглощающих примесей, организация зон застоя и т.п.

Обнаружение теплового самовоздействия пучка в этих условиях потребовало повысить на 2–3 порядка его мощность, апертуру и дальность по сравнению с пучком в [1]. В целом полученные результаты в определенной степени характеризуют прогресс в развитии атмосферной оптики за прошедшие 30 лет.

1. Leite R. C. C., Moore R. S., Whinnery J. R. Low absorption measurements by means of the thermal lens effect using an He-Ne laser // *Appl. Phys. Letts.*, 1 Oct. 1964. V. 5. N 7. P. 141–143.
2. Смит Д. К. // *ТИИЭР*. 1977. Т. 65. С. 59–103.
3. Гордин М. П. и др. // *Итоги науки и техники. Сер. Радиотехника*. 1980. Т. 20. С. 206–289.
4. Зуев В. Е. *Распространение лазерного излучения в атмосфере*. М.: Радио и связь, 1981.
5. Miller T. G. et al. // *JOSA*. 1975. V. 65. P. 1191.
6. Рудаш В. К. и др. // *Тезисы докладов на I Всес. симп. по распространению лазерного излучения в атмосфере*. Томск, 1977. С. 169–172.
7. Банах В. А., Карасев В. В., Коняев Ю. А. и др. // *Оптика атмосферы и океана*. 1993. Т. 6. N 12. С. 1551–1556.
8. Густов Л. В., Федоров М. А. // *Судостроительная промышленность. Сер. Общетеchnическая*. 1991. Вып. 35. С. 62–66.
9. Robert R. E. et al. // *Appl. Opt.* 1976. V. 15. P. 2085–2089.
10. Breig E. L. // *JOSA*. 1972. V. 62. P. 518–524.
11. Федоров М. А. // *Письма в ЖЭТФ*. 1992. Т. 56. Вып. 9. С. 455–460.
12. Федоров М. А. // *Оптика атмосферы и океана*. 1994. Т. 7. N 3. С. 327–330.
13. Густов Л. В., Федоров М. А. // *Судостроительная промышленность. Сер. Общетеchnическая*. 1991. Вып. 35. С. 66–72.
14. Густов Л. В., Ковалевский Д. Я., Федоров М. А. // *Тезисы докладов на XII Межреспубликанском симпозиуме по распространению лазерного излучения в атмосфере и водных средах*. Томск, 1993. С. 128.

Всероссийский научно-исследовательский институт «Альтаир»,
г. Москва

Поступила в редакцию
14 декабря 1994 г.

A. I. Zhukov, D. Ja. Kovalevskii, M. A. Fedorov. **Experimental Detection of Optical Beam Thermal Blooming in the Atmosphere.**

The experimental results are presented on measurement of attenuation of CW optical radiation beam inside natural clear atmosphere along near-ground path. The analysis of the data obtained indicates an additional attenuation of the beam comparative to molecular absorption, which could be explained as a manifestation of its thermal blooming.