

## НЕЛИНЕЙНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ

А.А. Землянов, Г.А. Мальцева, В.А. Погодаев

УДК 530.182.551.510.42

**ПРОЗРАЧНОСТЬ ОПТИЧЕСКОГО КАНАЛА ВО ВЛАЖНЫХ АТМОСФЕРНЫХ ДЫМКАХ В УСЛОВИЯХ ОПТИЧЕСКОГО ПРОБОЯ**

В работе проводится численное исследование распространения фокусированного лазерного излучения  $\lambda = 10,6$  мкм во влажных атмосферных дымках различного химического состава, для различных значений метеорологической дальности видимости. Исследуются возможности оптимального изменения радиуса пучка, угла фокусировки излучения, крутизны переднего фронта импульса при неизменной энергии импульса с целью повышения прозрачности канала воздействия. Показано, что изменение параметров пучка позволяет повышать прозрачность канала для сухих дымок на 50–70%, для влажных на 10–15% за счет ухудшения условий образования плазменных очагов. Влияние влажности на процесс образования плазменных очагов приводит к уменьшению длины лазерной искры  $\sim 1,2\div 2$  раза. Влияние химического состава поглощающих частиц на прозрачность оптического канала не превышает  $\sim 10\%$ .

Распространение интенсивного лазерного излучения в атмосферном аэрозоле сопровождается различными нелинейными эффектами, основными из которых являются тепловые эффекты разрушения аэрозольных частиц: испарение жидких и твердых частиц, взрыв, пробой, горение и т.д. [1].

В работе проводится численное исследование распространения интенсивного фокусированного лазерного излучения  $\lambda = 10,6$  мкм во влажных атмосферных дымках различного химического состава с фоновой концентрацией крупной фракции в условиях пробоя и испарения жидкой фазы аэрозолей. Исследуются возможности оптимального изменения параметров пучка и оптической системы с целью повышения прозрачности канала воздействия.

Основными нелинейными процессами при распространении интенсивного излучения в дымках и туманных дымках являются испарение жидкой фазы аэрозолей, приводящее к просветлению канала воздействия; пороговое возникновение на твердых частицах очагов пробоя, препятствующих дальнейшему распространению излучения [2]. Эти два процесса в зависимости от энергии и формы импульса, условий фокусировки излучения, концентрации и микроструктуры аэрозоля, существенно зависящих от относительной влажности воздуха  $f$ , определяют прозрачность оптического канала, его передаточные свойства.

При математическом описании испарения жидкой фазы аэрозоля использовалась двухслойная модель частиц с твердым ядром и растворной оболочкой. Размер оболочки обусловлен влажностью воздуха и наличием растворимых солей, определяющих характер ассимиляции влаги на ядрах конденсации [3]

$$a = a_d \cdot \sqrt{1 - G + b(1 - f)}, \quad (1)$$

где  $a$ ,  $a_d$  — размер влажной и сухой частиц;  $G$  — относительная доля растворимых компонентов в сухом остатке;  $b$  — параметр, зависящий от химического состава растворимого вещества;  $f$  — относительная влажность воздуха.

Система уравнений, состоящая из уравнения испарения двухслойной частицы, баланса тепла и соли, а также уравнения роста твердого ядра при испарении насыщенной растворной оболочки описана в [4]. Там же рассчитывались оптические характеристики испаряющихся обводненных частиц.

Для математического описания порогового возникновения очагов пробоя и расчета их оптических характеристик использовалась модель выровненных параметров [5]. По этой модели рассчитывается коэффициент ослабления возникающих плазменных очагов (ПО):

$$\alpha_{\text{ПО}} = 2\pi \cdot N \cdot P \left( \int_{t_3}^t \left[ \frac{(\gamma - 1) \cdot I}{2(\gamma + 1) \rho_0} \right]^{1/3} dt \right), \quad (2)$$

где  $I$  — интенсивность, при которой возникают плазменные очаги;  $(t - t_3)$  — время существования плазменного очага, обусловленное выполнением пороговых условий;  $t_3$  — время задержки образования ПО;  $P$  — параметр, определяющий пороговый характер возникновения очагов:  $P = 0$  при  $I < I_{\text{пор}}$ ,  $P = 1$  при  $I \geq I_{\text{пор}}$ ;  $N$  — концентрация очагов;  $\gamma$  — показатель адиабаты;  $\rho_0$  — начальная

плотность воздуха в плазменном очаге. Предполагалось, что ПО возникают на твердых частицах с размером, большим или равным критическому размеру  $a_{кр}$ . Значения  $a_{кр}$  и зависимость пороговой интенсивности  $I_{пор}(a_{кр})$  взяты из эксперимента [6, 7] ( $I_{пор} \sim 5 \cdot 10^7$  Вт/см<sup>2</sup>,  $a_{кр} \sim 6$  мкм). Функция распределения плазменных очагов задавалась как  $f(R_{по}^{(0)}) = f_0(a \geq a_{кр})$  то есть число плазменных очагов и их начальные размеры  $R_{по}^{(0)}$  совпадают с числом частиц крупной фракции и их размерами;  $f_0$  — начальная функция распределения атмосферного аэрозоля;  $(t - t_3)$  — находилось из совместного решения  $I_{пор}(a)$  и  $I(t)$  (форма импульса);  $t_3$  — определялось по совокупному времени прогрева двухслойной частицы до температуры сброса водной оболочки ( $T \sim 580^\circ\text{K}$ ) и прогрева твердой частицы до температуры испарения ( $T_{исп}$ ). Предполагалось, что при  $I(t) < I_{пор}$   $\alpha_{по} = 0$ .

Коэффициенты ослабления испаряющихся частиц и плазменных очагов составляют суммарный коэффициент ослабления  $\alpha(I(z))$  на каждом участке трассы  $dz$ , оптическая толща накапливается по мере движения по трассе. Для расчета интенсивности излучения по трассе использовалось уравнение

$$I(z) = \frac{I_0}{g(z)} \exp\left(-\int_0^z \alpha(I(z)) dz - R^2/(R_0^2 \cdot g)\right), \quad (3)$$

где  $R$  — поперечная координата;  $R_0$  — начальный радиус пучка,  $g = \left(\frac{z}{L_d}\right) + \left(1 - \frac{z}{F}\right)^2$ ;  $I_0$  — начальная

интенсивность излучения;  $F$  — фокусное расстояние оптической системы;  $L_d$  — дифракционная длина. Расчеты проводились с учетом формы импульса, характерной для мощных СО<sub>2</sub>-лазеров: короткий передний фронт  $t_1 = 200$  нс и длина импульса  $t_{и} = 1,5$  мкс  $t_1$  менялись до 400 нс при той же полной длине и энергии импульса. Радиус пучка варьировался  $\sim$  в 2,5 раза. Функция распределения аэрозольных частиц и их концентрация вводились численно по реальным гистограммам [6, 7]. Концентрация крупной фракции ( $a \geq 6$  мкм) составляла  $N_{кф} = 3 \cdot 10^{-4}$  1/см<sup>3</sup>. В качестве ядер конденсации рассматривались SiO<sub>2</sub>, CaCO<sub>3</sub>, NaCl, растворимый компонент — NaCl,  $G = 0,2$ . Расчеты проводились для различных значений начальной энергии импульса  $E_0$  и различных значений относительной влажности воздуха  $f$ .

На рис. 1 приведены результаты расчетов прозрачности канала распространения интенсивного фокусированного лазерного излучения:  $\lambda = 10,6$  мкм в туманной дымке для значений пиковой интенсивности в начале трассы  $I_0 = 10^4$  Вт/см<sup>2</sup>, для нерастворимого ядра SiO<sub>2</sub>. Относительная влажность воздуха менялась от 0,7 до 0,975 (что соответствует метеорологической дальности видимости  $S_m = 5 \div 1$  км). Кривые 1 и 2 описывают отдельно прозрачность канала, обусловленную испаряющимся аэрозолем, и возникающими плазменными очагами пробоя. Кривая 3 — результирующая прозрачность канала. Из рисунка видно, что прозрачности, обусловленные ослаблением испаряющимся аэрозолем и очагами пробоя, по-разному зависят от влажности. Если для аэрозоля  $T$  резко падает с ростом  $f$  (кривая 1), что обусловлено обводнением частиц, то зависимость прозрачности для очагов пробоя (кривая 2) от влажности — обратная,  $T$  возрастает с ростом  $f$ , что связано с увеличением времени задержки пробоя при обводнении частиц, то есть с уменьшением  $\alpha_{по}$ . В зависимости от энергии импульса определяющим в формировании прозрачности канала может быть как испаряющийся аэрозоль для низкоэнергетичных пучков, так и плазменные очаги для высокоэнергетичных пучков.

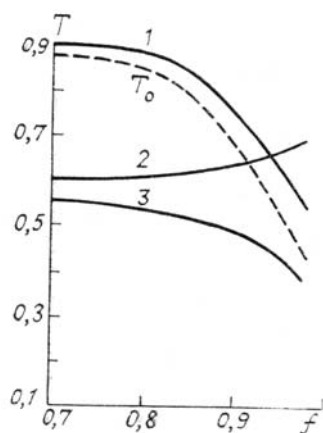


Рис. 1. Зависимость прозрачности канала (кривая 3) от влажности: 1 — аэрозоль; 2 — плазменные очаги

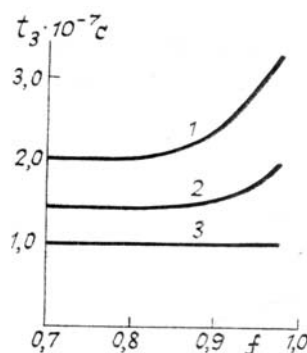


Рис. 2. Зависимость времени задержки пробоя от влажности:  $E = 7,35$  (кривая 1); 18,5 (2); 46,2 (3) Дж/см<sup>2</sup>

Влияние водной оболочки, обусловленной влажностью воздуха на время задержки образования очагов пробоя, приведено на рис. 2 для различных значений плотности энергии импульса:  $t_1 = 0,4$  мкс,  $t_{н} = 1,5$  мкс. Из рисунка видно, что для низких значений плотности энергии  $E_0 \lesssim 30$  Дж/см<sup>2</sup> время задержки образования плазменных очагов зависит от влажности и увеличивается для влажных частиц в 1,4–1,5 раза. С ростом энергии излучения (кривая 3 рис. 2), а также, как показали расчеты, и при увеличении крутизны переднего фронта ( $t_1 = 0,2$  мкс) влияние влажности на образование очагов пробоя не проявляется.

Для  $E_0 > 0,1$  Дж/см<sup>2</sup> роль плазменных очагов становится определяющей. Это сказывается, прежде всего, на уменьшении уровня прозрачности канала.

Проводились исследования влияния химического состава ядер конденсации на процессы испарения водной оболочки и пробоя частиц и, как результат, на прозрачность оптического канала. При неизменной функции распределения частиц по размерам и степени их обводнения рассматривались различные по химическому составу ядра конденсации, характерные для атмосферного аэрозоля: SiO<sub>2</sub>, CaCO<sub>3</sub>, NaCl.

В результате расчетов сделан вывод, что для поглощающих частиц (SiO<sub>2</sub>, CaCO<sub>3</sub>) влияние природы ядра на  $T$  не превышает 10%, для непоглощающих ядер NaCl прозрачность канала остается высокой для рассчитываемых значений энергии пучка, так как плазменные очаги либо не образуются, либо образуются очень слабые. Причем для влажных непоглощающих частиц прозрачность канала с ростом энергии пучка увеличивается за счет испарения водной фракции, а не падает, как для поглощающих частиц.

К числу параметров оптической системы и пучка, варьирование которых позволяет повышать  $T$  канала, то есть оптимизировать его передаточные свойства, относятся длина импульса, радиус пучка, крутизна переднего фронта импульса и острота фокусировки излучения. Как следует из формулы (3), влияние длины импульса для  $t > t_3$  и интенсивностей  $I > I_{пор}$  на коэффициент ослабления плазменных очагов имеет квадратичную зависимость. Поэтому уменьшение длины импульса при постоянном пиковом значении интенсивности приводит к уменьшению оптической толщи плазменных образований пропорционально  $(t - t_3)^2$ . Далее приводятся результаты численного исследования прозрачности канала при изменении параметров пучка и формы импульса, при постоянной длине импульса  $t_{н} = 1,5$  мкс.

Получено, что изменение радиуса пучка в 2,5 раза приводит к повышению прозрачности канала ~ на 8–10% для пучков с  $E_0 < 0,1$  Дж/см<sup>2</sup>. С ростом энергии пучка влияние изменения радиуса пучка на  $T$  составляет ~ 3–4%. Это связано с тем, что для низкоэнергетического излучения при уменьшении радиуса пучка по трассе изменяются пороговые условия возникновения плазменных очагов, в результате область существования ПО (длина лазерной искры) становится меньше. С ростом интенсивности уменьшение радиуса пучка слабо влияет на длину лазерной искры, а следовательно, и на прозрачность канала. Изменение крутизны переднего фронта импульса  $t_1$  ( $t_1$  – время нарастания интенсивности до своего пикового значения менялось от 0,2 до 0,4 мкс при сохранении полной энергии импульса, пиковой интенсивности и длины импульса) приводит к увеличению прозрачности канала примерно на 12–15% для  $E_0 = 0,185$  Дж/см<sup>2</sup> и сухих дымок. Для меньших энергий пучка и с ростом влажности влияние скорости нарастания интенсивности на  $T$  становится незначительным, что обусловлено уменьшением в обоих случаях времени существования плазменного очага. Наибольшее влияние на прозрачность канала, наряду с длиной импульса, оказывает острота фокусировки излучения. При сохранении всех параметров пучка и трассы влияние уменьшения остроты фокусировки (либо изменением площади пятна в фокусе от дифракционного до заданного значения  $S_{эфф}$ , либо фокусированием излучения на расстояние, большее длины, трассы) показано на рис. 3.

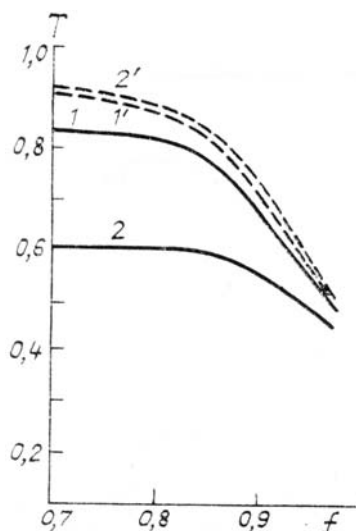


Рис. 3. Зависимость прозрачности канала от влажности для фокусированного (кривые 1, 2) и слабофокусированного излучения (1', 2')

В случае острой фокусировки (кривые 1 и 2:  $E_0 = 0,06; 0,185 \text{ Дж/см}^2$ ) выполняются пороговые условия образования плазменных очагов и с ростом энергии пучка происходит замутнение канала. Для не полностью сфокусированного пучка (кривые 1' и 2') интенсивность пучка по трассе не превышает пороговой, так что плазменные очаги не образуются и прозрачность трассы с ростом энергии пучка не падает, а возрастает за счет испарения жидкой фракции аэрозолей. Для рассматриваемых в расчетах энергий повышение прозрачности для более энергетичного пучка  $E_0 = 0,185 \text{ Дж/см}^2$  составляло 50% для сухих и 8% для влажных дымок.

На рис. 4 а представлена зависимость прозрачности аэрозольной компоненты (тип оптической погоды — дымка,  $S_m = 40 \text{ км}$  ( $f = 0,7$ )– $5 \text{ км}$  ( $f = 0,975$ )) от относительной влажности воздуха для различных значений энергии излучения. Сплошные линии — эксперимент, штриховые — рассчитанные зависимости. Кривая  $T_0$  характеризует прозрачность невозмущенного аэрозоля. Кривые 1–3 соответствуют значениям плотности энергии излучения в начале трассы;  $E_0 = 0,06; 0,16; 0,8 \text{ Дж/см}^2$ . Из рисунка видно, что с ростом энергии импульса прозрачность канала воздействия падает, насыщаясь на некотором уровне, определяемом условиями пробы и просветления данного полидисперсного аэрозоля. Зависимость прозрачности от влажности для больших плотностей энергии (кривая 3) приобретает практически нейтральный ход. На рис. 4 б приведена рассчитанная зависимость длины лазерной искры от влажности для туманной дымки ( $S_m = 5–1 \text{ км}$ ) для  $E_0 = 0,06; 0,18 \text{ Дж/см}^2$ . Видно, что с ростом энергии импульса длина искры растет, а зависимость ее от влажности уменьшается.

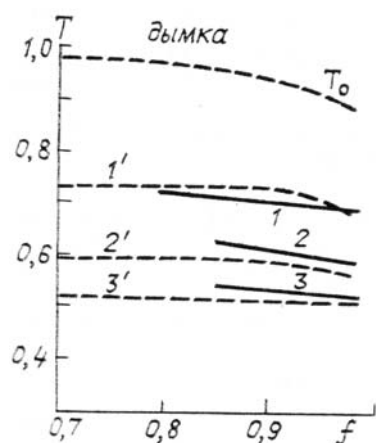


Рис. 4а. Зависимость прозрачности аэрозольной компоненты от влажности в условиях пробы: 1–3 — эксперимент; 1'–3' — расчет

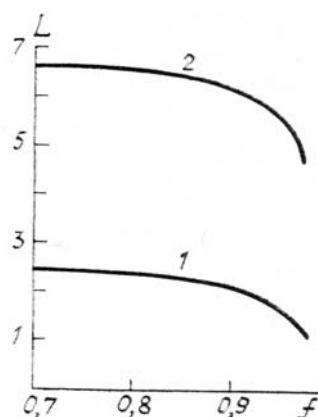


Рис. 4б. Зависимость длины лазерной искры от влажности, рассчитанная для  $E_0 = 0,06; 0,18 \text{ Дж/см}^2$  (кривые 1, 2)

Результаты проведенных расчетов показывают, что прозрачность канала распространения интенсивного фокусированного излучения во влажных атмосферных дымках определяется одновременным действием нескольких факторов, основными из которых являются плотность энергии излучения, значение пиковой интенсивности и длина импульса, оптические характеристики аэрозольных частиц, заполняющих канал, концентрация крупной фракции аэрозольных частиц, влажность воздуха и острота фокусировки излучения.

В результате расчетов можно сделать следующие выводы:

1) Для интенсивностей излучения в канале, не превышающих пороговых значений пробы, уровень прозрачности определяется энергетикой пучка и влажностью воздуха, и с ростом энергии излучения прозрачность канала возрастает. При интенсивности излучения в канале выше пороговой, уровень прозрачности определяется концентрацией возникающих плазменных очагов, которая также зависит от энергетик пучка и условий фокусировки. Влияние влажности в этом случае уменьшается. Для  $I_0 > 10^6 \text{ Вт/см}^2$  для фокусированных пучков влияние влажности на прозрачность канала не существенно.

2) Изменения параметров пучка и импульса при неизменной длине импульса с целью повышения прозрачности канала (такие как уменьшение крутизны переднего фронта импульса и радиуса пучка, неполная фокусировка излучения) приводят к уменьшению времени существования плазменных очагов или к ухудшению и срыву их образования. Для используемых в расчетах значений  $E_0 = 0,06–0,18 \text{ Дж/см}^2$  рассматриваемая оптимизация параметров пучка позволяет повысить прозрачность трассы на 50–70% для сухих и примерно на 10–15% — для влажных дымок.

3) Для используемых в расчетах значений плотности энергии влияние влажности на оптический пробой аэрозольных частиц проявляется в повышении энергозатрат на инициирование пробы влажных частиц в 1,2–1,7 раз. Влияние влажности на процесс образования очагов пробы приводит к изменению длины лазерной искры для сухих и влажных дымок:  $L_{\text{искр}}(f = 0,7)/L_{\text{искр}}(f = 0,975) \approx 1,2–2,0$ .

1. Зуев В.Е., Землянов А.А., Копытин Ю.Д., Кузиковский А.В. Мощное лазерное излучение в атмосферном аэрозоле. Новосибирск: Наука, 1984. 224 с.
2. Землянов А.А., Мальцева Г.А., Погодаев В.А. //IV Всес. совещание по распространению лазерного излучения в дисперсной среде. (Тезисы докл.). Обнинск. 1988. Т. 2. С. 95–97.
3. Пришивалко А.П., Бабенко В.А., Кузьмин В.Н. Рассеяние и поглощение света неоднородными и анизотропными сферическими частицами. Минск: Наука и техника. 1984. 263 с.
4. Мальцева Г.А. Прозрачность морской дымки, просветляемой интенсивным лазерным излучением. //ЖОА, 1988. Т. 1. № 2. С. 57–63.
5. Ахтырченко Ю.В., Васильев Л.А., Высоцкий Ю.М., Сотников В.Н. //II Всес. совещание по распространению лазерного излучения в дисперсной среде (Тезисы докл.). Обнинск: ИЭМ, 1982. Ч. 2. С. 90–93.
6. Копытин Ю.Д., Коханов В.И., Погодаев В.А. и др. //Квантовая электроника. 1988. Т. 15. № 2. С. 405–411.
7. Ахтырченко Ю.В., Беляев Е.Б., Высоцкий Ю.П. и др. Известия вузов. Физика. 1983. № 2. С. 5–13.

Институт оптики атмосферы СО АН СССР,  
Томск

Поступила в редакцию  
27 января 1989 г.

**A. A. Zemlyanov, G. A. Mal'tseva and V. A. Pogodaev. Transmission of the Optical Channel in Moist Atmospheric Hazes under the Conditions of the Optical Breakdown.**

The paper deals with the numerical simulations on propagation of a focused CO<sub>2</sub>-laser beam ( $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ ) in the moist atmospheric hazes of different chemical composition under different meteorological visual ranges. The problems on an optimal variation of the beam radius, focusing angle, and the slope of the front edge of the pulse at the constant pulse energy are investigated in order to determine the requirements for improving the transmission of the propagation channel. It is shown in the paper that the proper variation of the beam's parameters yields a 50 to 70 per cent improvement of the channel's transmission in dry hazes and 10 to 15 per cent in the moist ones because of making the conditions of plasma cells formation poorer.

The influence of the atmospheric humidity results in the decrease of the laser spark length by 1.2 to 2 times. The variation of the absorbing particles composition causes the changes in the atmospheric transmission which do not exceed 10 percent.