

## СПЕКТРОСКОПИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 533.6.011

# Вклад атмосферной турбулентности в искажения лазерных пучков, вызываемые ударной волной, формирующейся при сверхзвуковом обтекании турели

В.А. Банах, А.А. Сухарев\*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 29.01.2016 г.

Представлены результаты анализа средней интенсивности, флуктуаций интенсивности и регулярных и случайных смещений оптических пучков, распространяющихся через ударную волну, образующуюся при сверхзвуковом обтекании потоком воздуха турели, в турбулентной атмосфере. Показано, что с усилением оптической турбулентности влияние ударной волны, образующейся при сверхзвуковом обтекании турели, настолько сильно, что даже при наихудших условиях по турбулентности воздействие ударной волны на пучок остается преобладающим.

*Ключевые слова:* ударная волна, турель, средняя интенсивность, турбулентность, дисперсия флуктуаций интенсивности; shock wave, turret, mean intensity, turbulence, variance of intensity fluctuations.

### Введение

Ударная волна, образующаяся вследствие сверхзвукового движения летательного аппарата (ЛА) в турбулентной атмосфере, может существенно исказить оптический пучок, излучающийся с поверхности ЛА. Вопросам изучения искажающего влияния ударных волн или сред, содержащих скачки плотности, на оптическое излучение посвящены работы [1–12]. В частности, в [12] выполнены исследования распространения оптического пучка через ударную волну, которая формируется при обтекании турели, расположенной на фюзеляже движущегося со сверхзвуковой скоростью ЛА. В [12] предполагалось, что источник оптического излучения находится в турели ЛА, и расчеты оптических характеристик ударной волны проводились на основе моделирования сверхзвукового обтекания воздушным потоком турели. Из результатов [12], в частности, следует, что искажающее воздействие ударной волны может быть столь сильным, что происходят разбиение пучка на несколько частей уже в начале трассы и его последующее быстрое разрушение при дальнейшем распространении.

В [12] считалось, что за пределами ударной волны прошедшее через нее оптическое излучение искажений не испытывает. На самом деле в атмосфере всегда присутствуют неоднородности показателя преломления, вызываемые турбулентным перемешиванием воздуха. Поэтому важно знать вклад атмосферной турбулентности в искажения оптиче-

ских пучков, обусловленные аэрооптическими эффектами. В данной статье рассмотрена задача о прохождении оптического излучения через ударную волну, образующуюся вследствие сверхзвукового движения в турбулентной атмосфере ЛА, на фюзеляже которого расположена турель. Источник оптического излучения находится в турели ЛА. Используется та же модель пространственной структуры оптической турбулентности и распределения среднего значения показателя преломления вблизи ЛА, что и в [12]. Атмосферная турбулентность задается в соответствии с высотными моделями [13].

### Постановка задачи и исходные соотношения

Предположим, что движущийся со сверхзвуковой скоростью ЛА находится на высоте  $H$  над поверхностью Земли, а источник лазерного излучения – в турели на фюзеляже ЛА. Будем считать, что вблизи ЛА формируется ударная волна, конфигурация которой соответствует обтеканию турели, расположенной на фюзеляже движущегося со сверхзвуковой скоростью ЛА [12]. Будем рассматривать три случая распространения пучка: по вертикали вверх от вершины турели и под углом  $45^\circ$  относительно этой вертикали вперед и назад по ходу ЛА (рис. 1).

Решение задачи о распространении лазерного излучения вдоль направлений, показанных на рис. 1, осуществлялось численно на основе параболического уравнения для комплексной амплитуды поля распространяющейся волны  $U(z, \mathbf{r})$  [14]:

\* Виктор Арсентьевич Банах (banakh@iao.ru); Артем Андреевич Сухарев (sukharev@iao.ru).

$$2ik \frac{\partial U(z, \mathbf{r})}{\partial z} + \Delta U(z, \mathbf{r}) + k^2 n(z, \mathbf{r}) U(z, \mathbf{r}) = 0, \quad (1)$$

где предполагается, что распространение происходит вдоль оси  $z$ ;  $\mathbf{r} = \{x, y\}$  – двумерный вектор, ортогональный направлению распространения;  $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ ;  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число,  $\lambda$  – длина волны излучения;  $n(z, \mathbf{r})$  – отклонение показателя преломления воздуха от единицы, определяемое турбулентностью атмосферы и ударной волной. Начальное распределение поля задавалось в виде коллимированного гауссова пучка

$$U_0(\mathbf{r}) = U_0 \exp\left\{-\frac{r^2}{2a^2}\right\}$$

с эффективным радиусом на выходной апертуре  $a$ .

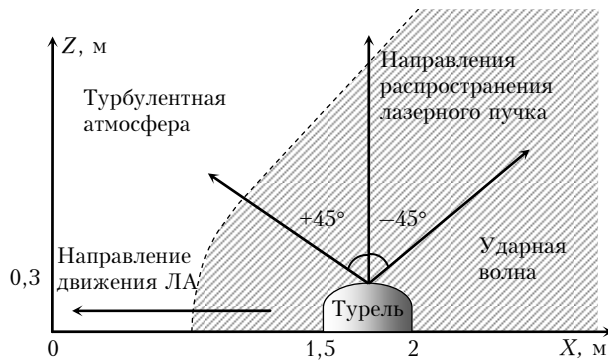


Рис. 1. Геометрия распространения и модель турели сверхзвукового летательного аппарата

Для численного решения уравнения (1) использовался метод расщепления по физическим факторам с разбиением трассы распространения на слои, в каждом из которых турбулентные искажения оптического излучения моделируются с помощью фазовых экранов, а между экранами учитывается лишь дифракция излучения [15, 16]. Моделирование фазовых экранов на атмосферных участках трассы осуществлялось на основе колмогоровской модели турбулентности показателя преломления воздуха с использованием полуэмпирической модели высотного профиля  $C_n^2$  в атмосфере [13] для задания значений  $C_n^2$  на каждом из экранов вдоль трассы распространения.

Построенная на основе известных экспериментальных данных высотная модель  $C_n^2$  [13] определяет изменение структурной характеристики показателя преломления с высотой для трех типов «турбулентной погоды», которые соответствуют наилучшим, средним и наихудшим условиям распространения света в атмосфере. В соответствии с этой моделью структурная характеристика с высотой изменяется в следующих диапазонах:  $5 \cdot 10^{-16} \div 9 \cdot 10^{-19} \text{ м}^{-2/3}$  – наилучшие условия,  $7 \cdot 10^{-15} \div 2 \cdot 10^{-18} \text{ м}^{-2/3}$  – средние условия,  $1 \cdot 10^{-13} \div 5 \cdot 10^{-18} \text{ м}^{-2/3}$  – наихудшие условия [13].

Вызываемые ударной волной изменения показателя преломления на начальных участках трасс моделировались также с помощью фазовых экранов [12]. Фазовые экраны для всех рассматриваемых случаев распространения моделировались в соответствии с распределением среднего значения  $\bar{n}(z, \mathbf{r})$  и случайных флуктуаций  $n'(z, \mathbf{r})$  показателя преломления воздуха [12]. Значения  $C_n^2$  на фазовых экранах в области ударной волны изменялись в диапазоне  $2,2 \cdot 10^{-11} \div 8,7 \cdot 10^{-13} \text{ м}^{-2/3}$  на высоте 10 км. Полученное в результате такого моделирования распределение комплексного поля лазерного излучения на границе ударной волны принималось за начальное распределение поля при моделировании распространения в атмосфере.

## Результаты численных экспериментов

Расчеты средней интенсивности  $\langle I(z, \mathbf{r}) \rangle = \langle U(z, \mathbf{r}) U^*(z, \mathbf{r}) \rangle$  (угловые скобки означают усреднение по ансамблю реализаций,  $I(z, \mathbf{r})$  – случайное распределение интенсивности пучка), относительной дисперсии флуктуаций интенсивности  $\sigma_I(z, \mathbf{r})$ , регулярного смещения  $\sigma_r$  и дисперсии случайных смещений энергетического центра тяжести  $\sigma_c^2$  проводились для пучка с эффективным радиусом на выходной апертуре  $a = 5$  и 10 см, длина волны излучения задавалась равной 1,06 мкм, высота ЛА полагалась равной 10 км. Протяженность трасс распространения выбиралась не только из их геометрии (см. рис. 1) с учетом модели [13], где высота турбулентной атмосферы ограничена 20 км, но и из возможности провести численное моделирование. Таким образом, распространение от турели вверх осуществлялось до внешней границы атмосферы, т.е. на 10 км. При распространении пучка под углом 45° вперед и назад по ходу движения ЛА протяженность трасс была равна  $L = 3$  км.

Расчет относительной дисперсии флуктуаций интенсивности проводился по формуле [14]:

$$\sigma_I(z, \mathbf{r}) = \sqrt{\frac{\langle I^2(z, \mathbf{r}) \rangle}{\langle I(z, \mathbf{r}) \rangle^2} - 1}, \quad (2)$$

среднее смещение  $\sigma_r = |\rho_r|$  и дисперсия случайных смещений энергетического центра тяжести пучка  $\sigma_c^2 = \langle (x_c^2 + y_c^2) \rangle$ , где  $\{x_c, y_c\}$  – координаты случайного вектора энергетического центра тяжести пучка  $\rho_c$ ;  $\rho_r = \{x_r, y_r\}$  – радиус-вектор, определяющий среднее смещение пучка относительно прямолинейного распространения. Вектора  $\rho_c$  и  $\rho_r$  задаются соотношениями

$$\rho_r(x_r, y_r) = \frac{\int \mathbf{r} \langle I(\mathbf{r}) \rangle d\mathbf{r}}{\int \langle I(\mathbf{r}) \rangle d\mathbf{r}}, \quad (3)$$

$$\rho_c(x_c, y_c) = \frac{\int (\mathbf{r} - \rho_r) I(\mathbf{r} - \rho_r) d\mathbf{r}}{\int I(\mathbf{r} - \rho_r) d\mathbf{r}} \quad (4)$$

Число случайных реализаций, использовавшихся для оценки статистических параметров пучка, определялось из условия, что относительная среднеквадратическая погрешность оценивания статистического параметра не должна превышать 0,2, и, как правило, не превышало 500.

На рис. 2 показаны нормированные максимальные значения средней интенсивности в поперечном сечении пучка  $\langle I_{\max}(z, \mathbf{r}) \rangle$  с начальным радиусом  $a = 5$  (рис. 2, а) и 10 см (рис. 2, б) при распространении с высоты 10 км в сравнении с пучком, распространяющимся в однородной среде (кривые 5, 5', 5'') и в турбулентной атмосфере при наихудших условиях для распространения света (кривые 4, 4').

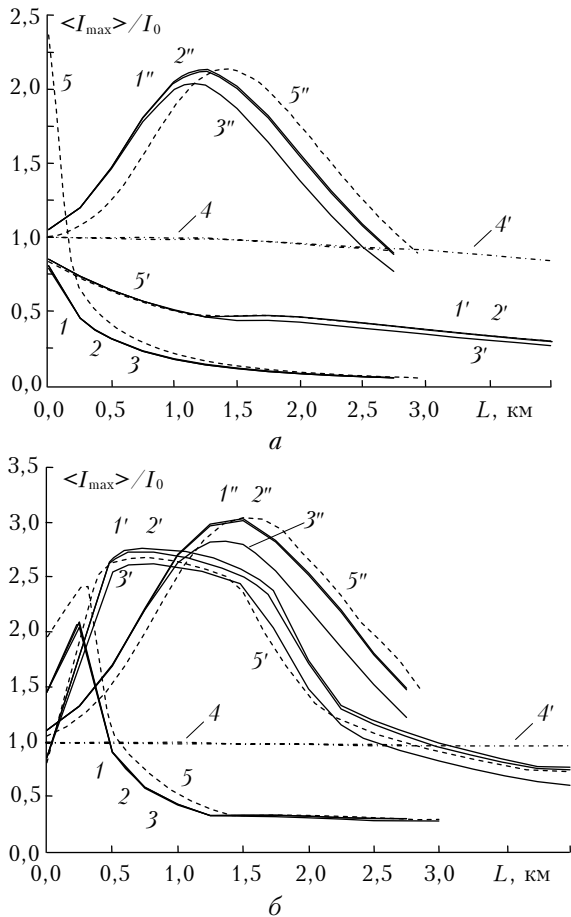


Рис. 2. Зависимость  $\langle I_{\max} \rangle / I_0$  от  $L$ . Наилучшие (1, 1', 1''), средние (2, 2', 2''), наихудшие (3, 3', 3'') условия для распространения света. 4, 4' – наихудшие условия без ударной волны. 5, 5', 5'' – распространение в однородной среде (пунктирная линия).  $a = 5$  см (а), 10 см (б). Распространение вперед (без штриха), вверх (один штрих), назад (два штриха)

Нормировка средней интенсивности на графике осуществляется на текущее дифракционное зна-

чение интенсивности  $I_0$  на оси пучка. Из рис. 2 следует, что для ЛА на высоте 10 км атмосферная турбулентность практически не оказывает влияния на фокусировку пучка ударной волной [12] при любых условиях для распространения света. Однако из рис. 2, а можно видеть, что при распространении под углом  $45^\circ$  вперед по ходу движения ЛА через область максимальных возмущений показателя преломления в ударной волне (кривые 1, 2, 3, 5), где пучок приобретает наибольшие искажения, атмосферная турбулентность, даже слабая, подавляет эффект фокусировки пучка ударной волной. С увеличением размеров выходной апертуры (рис. 2, б) качественным образом ничего не меняется. Из рис. 2 следует, что влияние ударной волны, образующейся при сверхзвуковом обтекании турели, настолько сильно, что даже при наихудших условиях по турбулентности воздействие ударной волны на пучок остается главенствующим.

Результаты расчета относительной дисперсии флуктуаций интенсивности  $\sigma_I(z, \mathbf{r})$  представлены на рис. 3.

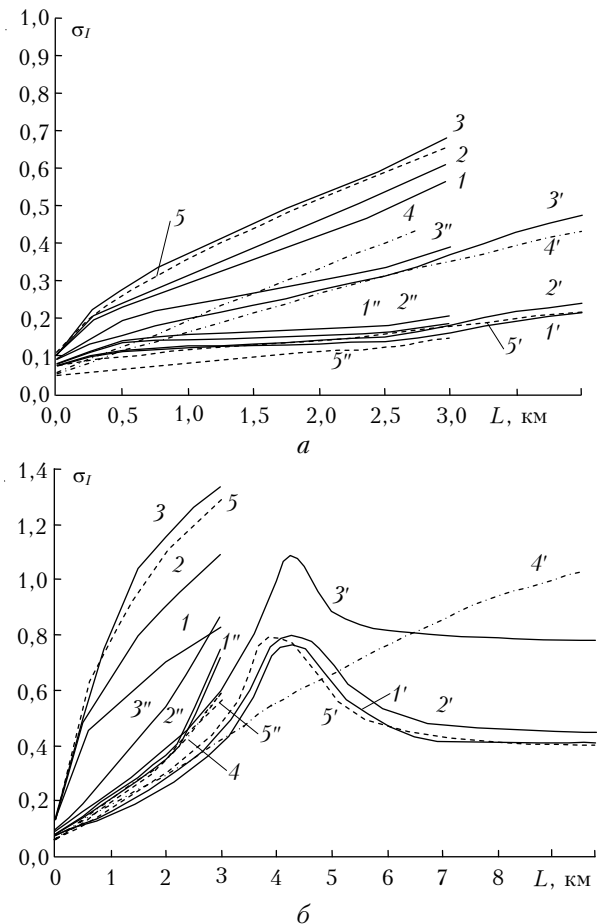


Рис. 3. Зависимость  $\sigma_I$  от  $L$ . Наилучшие (1, 1', 1''), средние (2, 2', 2''), наихудшие (3, 3', 3'') условия для распространения света. 4, 4' – наихудшие условия без ударной волны. 5, 5', 5'' – распространение в однородной среде (пунктирная линия).  $a = 5$  см (а), 10 см (б). Распространение вперед (без штриха), вверх (один штрих), назад (два штриха)

Расчеты дисперсии проводились в точке с координатами усредненного энергетического центра тяжести пучка  $\mathbf{r} = \mathbf{p}_c$ . Из рис. 3 видно, что турбулентность атмосферы приводит к увеличению флуктуаций интенсивности в пучке, прошедшем ударную волну, однако вследствие ограниченной протяженности трассы относительная дисперсия не успевает достигнуть насыщения. Кривые 4 и 4' на рисунке описывают распространение пучка в турбулентной атмосфере в отсутствие ударной волны. Видно, что ударная волна существенным образом меняет поведение дисперсии флуктуаций интенсивности оптического пучка в сравнении с  $\sigma_I(z, \mathbf{r})$ , полученным в отсутствие ударной волны. Качественное поведение  $\sigma_I(z, \mathbf{r})$  в турбулентной атмосфере остается таким же, что и при распространении пучка через ударную волну в однородной среде (кривые 5, 5', 5''): относительная дисперсия растет тем быстрее, чем больше начальный поперечный размер пучка. То есть чем больше случайная разность фаз в пределах пучка, тем выше должен быть

уровень насыщения флуктуаций интенсивности [17]. Также можно видеть, что при распространении под углом  $45^\circ$  вперед по ходу движения ЛА пучок, проходя через ударную волну, приобретает такие фазовые флуктуации (кривая 5 на рис. 3), что дальнейшее распространение в атмосфере, при наилучших условиях по турбулентности, приводит к меньшим значениям дисперсии флуктуаций интенсивности по сравнению со значениями  $\sigma_I(z, \mathbf{r})$  в отсутствие турбулентности.

Рис. 4 показывает результаты расчета среднеквадратического отклонения случайных смещений оптических пучков.

Из рис. 4, а, в следует, что при распространении вверх и назад под углом  $45^\circ$ , при наилучших и средних условиях распространения света, влияние турбулентности на случайное смещение пучка невелико. Угловое среднеквадратическое отклонение случайных смещений пучка после прохождения ударной волны уменьшается с увеличением длины трассы, как и в однородной среде (кривые 5', 5'').

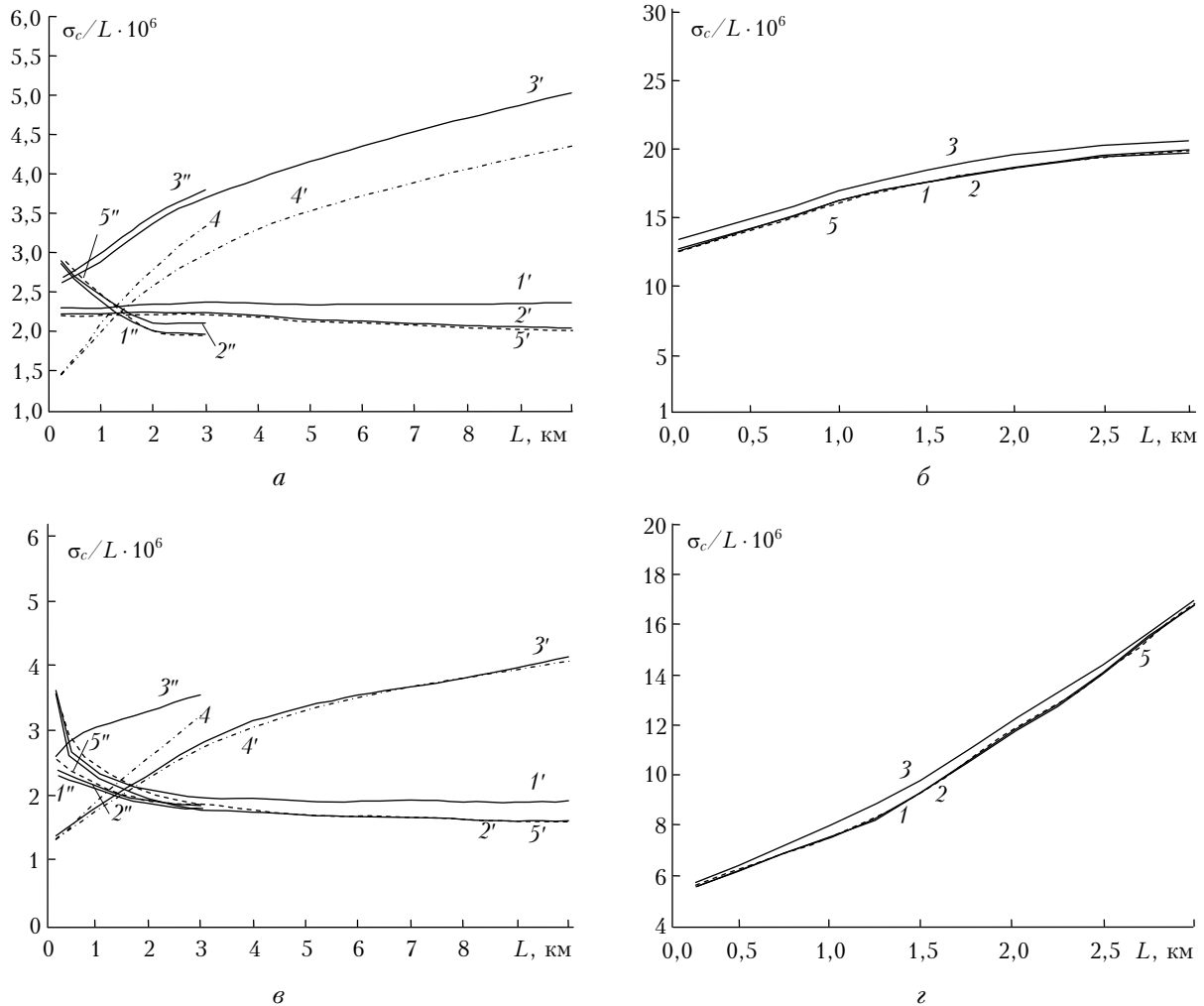


Рис. 4. Дисперсия случайных смещений  $\sigma_c/L$  оптического пучка. Наилучшие (1, 1', 1''), средние (2, 2', 2''), наихудшие (3, 3', 3'') условия для распространения света. 4, 4' — наихудшие условия без ударной волны. 5, 5', 5'' — распространение в однородной среде (пунктирная линия). а, б — 5 см (а, б), 10 см (в, г). Распространение вперед (без штриха), вверх (один штрих), назад (два штриха)

## Заключение

С ростом интенсивности оптической турбулентности изменяется ход  $\sigma_c/L$ . При наихудших условиях для распространения света с увеличением длины трассы угловое среднеквадратическое отклонение пучка после прохождения ударной волны начинает расти (кривые 3', 3''), как и в отсутствие ударной волны (кривые 4, 4'). Кроме того, наличие ударной волны, формирующейся при сверхзвуковом обтекании турели, может существенно увеличить величину среднеквадратического отклонения случайных смещений энергетического центра тяжести пучка (рис. 4, б и з).

Величина регулярного смещения  $\sigma_r$  оптического пучка (рис. 5) линейно растет с увеличением длины трассы и очень слабо зависит от турбулентных условий распространения. Регулярные отклонения, вызванные ударной волной, намного превосходят величину случайных блужданий пучка из-за атмосферной турбулентности.

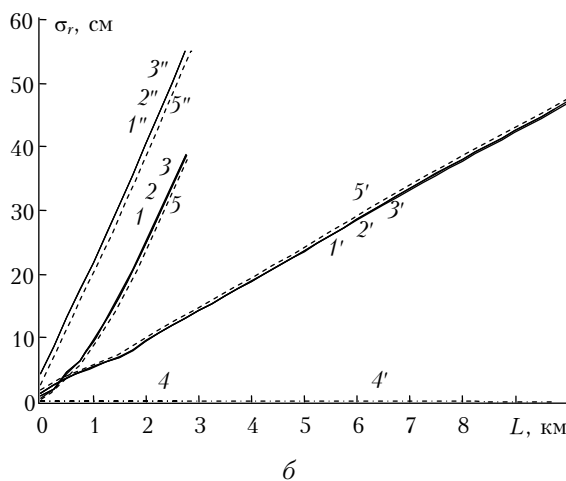
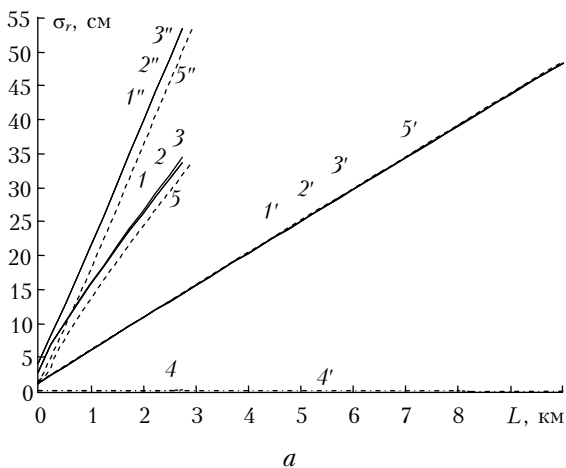


Рис. 5. Регулярное смещение  $\sigma_r$  оптического пучка. Наилучшие (1, 1'), средние (2, 2', 2''), наихудшие (3, 3', 3'') условия для распространения света. 4, 4' – наихудшие условия без ударной волны. 5, 5', 5'' – распространение в однородной среде (пунктирная линия). а = 5 см (а), 10 см (б). Распространение вперед (без штриха), вверх (один штрих), назад (два штриха)

Представлены результаты исследования вклада атмосферной турбулентности в искажающее влияние ударной волны, формирующейся при сверхзвуковом обтекании ЛА с турелью на фюзеляже, на распространяющееся через нее оптическое излучение. Показано, что влияние ударной волны, образующейся при сверхзвуковом обтекании турели, настолько сильно, что даже при наихудших условиях по турбулентности воздействие ударной волны на пучок остается главенствующим. Это искажающее воздействие ударной волны на оптический пучок может быть очень сильным, что приводит к быстрому разрушению пучка уже на трассах в несколько километров.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-08-06549).

1. Frumker E., Pade O. Generic method for aero-optic evaluations // *Appl. Opt.* 2004. V. 43, N 16. P. 3224–3228.
2. Pade O. Propagation through Shear Layers // *Proc. SPIE.* 2006. V. 6364. P. 63640E.
3. Волков К.Н., Емельянов В.Н. Аэрооптические эффекты в турбулентном потоке и их моделирование // *Ж. техн. физ.* 2008. Т. 78, вып. 2. С. 77–82.
4. Henriksson M., Sjöqvist L., Parmhed O., Fureby C. Numerical laser beam propagation using large eddy simulation of a jet engine flow field // *Opt. Eng.* V. 54, iss. 8. 085101 (10 p.). DOI: 10.1117/1.OE.54.8.085101.
5. Bo L., Hong L. Aero-Optical Characteristics of Supersonic Flow over Blunt Wedge with Cavity Window // *J. Shanghai Jiaotong Univ.* 2011. V. 16, iss. 6. P. 742–749.
6. Xu L., Cai Y. Influence of altitude on aero-optic imaging deviation // *Appl. Opt.* 2011. V. 50, N 18. P. 2949–2957.
7. Wang M., Mani A., Gordeev S. Physics and Computation of Aero-Optics // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2012. V. 44. P. 299–321.
8. Gao Q., Yi S.H., Jiang Z.F., He L., Zhao Y.X. Hierarchical structure of the optical path length of the supersonic turbulent boundary layer // *Opt. Express.* 2012. V. 20, iss. 15. P. 16494–16503.
9. Банах В.А., Сухарев А.А., Фалиц А.В. Дифракция оптического пучка на ударной волне, возникающей вблизи сверхзвукового летательного аппарата // *Оптика атмосф. и океана.* 2013. Т. 26, № 11. С. 932–941.
10. Banakh V.A., Sukharev A.A., Falits A.V. Optical beam distortions induced by a shock wave // *Appl. Opt.* 2015. V. 54, iss. 8. P. 2023–2031.
11. Банах В.А., Сухарев А.А., Фалиц А.В. Проявление аэрооптических эффектов в турбулентной атмосфере при сверхзвуковом движении конусообразного тела // *Оптика атмосф. и океана.* 2014. Т. 27, № 8. С. 679–688; Banakh V.A., Sukharev A.A., Falits A.V. Manifestation of aero-optical effects in a turbulent atmosphere in supersonic motion of a conical body // *Atmos. Ocean. Opt.* 2015. V. 28, N 1. P. 24–33.
12. Банах В.А., Сухарев А.А. Искажения лазерных пучков, вызываемые ударной волной вблизи турели сверхзвукового летательного аппарата // *Оптика атмосф. и океана.* 2016. Т. 29, № 1. С. 14–22.

13. *Гурвич А.С., Грачева М.Е.* Простая модель для расчета турбулентных помех в оптических системах // Изв. АН СССР. Физика атмосф. и океана. 1980. Т. 16, № 10. С. 1107–1111.
14. *Зуев В.Е., Банах В.А., Покасов В.В.* Оптика турбулентной атмосферы. Современные проблемы атмосферной оптики. Т. 5. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 270 с.
15. *Кандидов В.П.* Метод Монте-Карло в нелинейной статистической оптике // Успехи физ. наук. 1996. Т. 166, № 12. С. 1309–1338.
16. *Татарский В.И.* Распространение лазерного излучения в атмосфере. М.: Наука, 1967. 548 с.
17. *Рытов С.М., Кравцов О.А., Татарский В.И.* Введение в статистическую радиофизику. Ч. 2. М.: Наука, 1978. 463 с.

***V.A. Banakh, A.A. Sukharev. Contribution of atmospheric turbulence in distortions of laser beams caused by a shock wave arising at the supersonic flowing the turret.***

In this article, we present the results of analysis of the mean intensity, intensity fluctuations, and regular and random wandering of the optical beams crossing a shock wave arising at the supersonic flowing the turret in a turbulent atmosphere. It is shown that with increase of the optical turbulence the impact of the shock wave, arising at the supersonic flowing the turret, is so strong that even at the worst turbulent condition the aero optical impact of the shock wave on the optical beam remains predominant.