

В.С. Сиразетдинов, Д.И. Дмитриев, И.В. Иванова, Д.Г. Титтертон<sup>1</sup>

## Воздействие струи турбореактивного авиационного двигателя на лазерное излучение. Ч. 2. Случайные блуждания возмущенного пучка

*НИИ комплексных испытаний оптико-электронных приборов и систем, г. Сосновый Бор, Ленинградская обл.  
<sup>1</sup> ДЭРА, г. Фарнборо, Великобритания*

Поступила в редакцию 17.09.2001 г.

Экспериментально измерена дисперсия блужданий центроида лазерных пучков, пересекающих под различными углами ( $\varphi = 90, 45, 10^\circ$ ) струю авиационного двигателя. Полученные значения лежат в пределах  $\sim 60 \div 180$  мкрад для  $\lambda = 1,06$  мкм и  $110 \div 300$  мкрад для  $\lambda = 0,53$  мкм. Обнаружено различие дисперсии блужданий пучков в горизонтальном и вертикальном (ортogonalном к оси струи) направлениях. Приведена аналитическая модель для расчета дисперсии блужданий лазерных пучков, согласованная с экспериментальными данными. Результаты эксперимента позволили оценить вид высокочастотной составляющей спектра флуктуаций показателя преломления в струе, дополняющей спектр Кармана для турбулентной среды.

Случайные блуждания лазерного пучка как целого при распространении излучения на естественных атмосферных трассах достаточно хорошо изучены [1]. Это важно для многих практических приложений, где для проведения точных измерений используется лазерное излучение. Во многих случаях экспериментальные измерения дисперсии смещений центроида пучка, корреляционные характеристики блужданий позволяют уточнить характеристики турбулентной среды, например параметры пространственного спектра флуктуаций показателя преломления. В связи с этим несомненный интерес представляет исследование данного эффекта в условиях, когда турбулентность атмосферы обусловлена техногенными факторами. В подобных ситуациях уровень турбулентности в среде на несколько порядков превышает естественную турбулентность атмосферы, возможны и другие особенности, обусловленные природой источника возмущений среды, не позволяющие без специальных исследований применять уже развитые методы теоретического анализа случайных блужданий пучка.

В настоящей статье представлены результаты измерений дисперсии блужданий «центра тяжести» лазерных пучков, возмущенных высокоскоростной турбулентной струей авиационного двигателя, и дана интерпретация полученных результатов на основе сопоставления экспериментальных и расчетных данных.

Измерения производились в рамках того же цикла экспериментальных исследований, что и в работе [2], в которой подробно описаны методика и оптическая схема эксперимента. Коротко отметим важные моменты условий эксперимента. В качестве источника струи использовался турбореактивный двигатель Р-25-300 с диаметром сопла 55 см. Температура струи на выходе из сопла составляла  $\approx 380^\circ\text{C}$ , а ее скорость на оси в 1 м от сопла – около 600 км/ч. В экспериментах оси струи и лазерного пучка лежали в горизонтальной плоскости на высоте 150 см над землей, пучок входил в струю на расстоянии около полуметра от сопла и проходил через ее центральную область. Исследования осуществлялись при распространении лазерного пучка как поперек (угол пересечения струи пучком  $\varphi_1 = 90^\circ$  и

$\varphi_2 = 45^\circ$ ), так и почти вдоль оси струи ( $\varphi_3 = 10^\circ$ ), при этом длина пути пучка в зоне турбулентности составляла  $L_t = 0,8; 1,4$  и около 60 м соответственно.

Лазер на гранате, активированном неодимом, работал в импульсно-периодическом режиме на длинах волн  $\lambda = 1,06$  и  $0,53$  мкм одновременно. Длительность импульсов излучения лазера с энергией 3–5 мДж не превышала 30 нс, частота повторения импульсов составляла 12,5 Гц. Диаметр пучка с почти равномерным распределением интенсивности определялся размером диафрагмы – 10 или 30 мм, расположенной в 2–3 м от границы струи.

Дистанция от лазера до приемной системы составляла около 80 м. Регистрация дальнопольных распределений интенсивности в каждом импульсе излучения осуществлялась одновременно на двух длинах волн  $\lambda = 0,53$  и  $1,06$  мкм ПЗС-камерами, расположенными в фокальной плоскости объектива. Диаметр приемного объектива равнялся 300 мм, фокусное расстояние – 265 см. Запись практически «мгновенных» изображений сечения пучка осуществлялась в цифровом виде в памяти ЭВМ, принимающих сигнал с ПЗС-камер. Количество записанных изображений в каждом цикле измерений, т.е. размер статистического массива для последующей обработки данных, составлял не менее 1500 кадров.

Подчеркнем, что примененная методика эксперимента позволила регистрировать «мгновенные» изображения лазерных пучков, прошедших через одни и те же неоднородности в скоростной турбулентной струе.

Величина ожидаемых угловых смещений пучка под действием струи двигателя очень невелика – доли миллирадиана. Поэтому большое внимание было уделено виброзащите лазера, расположенного в нескольких метрах от двигателя, и всех элементов оптической схемы. Кроме того, возможно дрожание пучка под влиянием естественной турбулентности на атмосферной трассе длиной более 80 м. В связи с этим были выполнены контрольные эксперименты, в которых осуществлялась проверка влияния, создаваемого работающим двигателем виброфона, на характеристики регистрируемого лазерного излучения. В этих экспериментах вибрационная обстановка и параметры

оптической трассы сохранялись, однако лазерный пучок не проходил через струю работающего в обычном режиме двигателя.

В табл. 1 приведены усредненные по ансамблю реализаций дисперсия случайных блужданий центроида и угловая полуширина лазерных пучков для горизонтального ( $\sigma_x$  и  $\theta_x$  – вдоль струи) и вертикального  $\sigma_y$  и  $\theta_y$  сечений, измеренные как в контрольных экспериментах, так и при выключенном двигателе. В последнем случае данные характеризуют влияние атмосферной трассы на лазерное излучение.

Видно, что лазерные пучки не подвержены действию вибраций, возбуждаемых двигателем, а отмеченное небольшое дрожание пучка обусловлено естественной атмосферной турбулентностью.

В табл. 2 приведены результаты измерений, усредненных по ансамблю реализаций более 1500 кадров среднеквадратических случайных угловых смещений центроида лазерных пучков, пересекающих струю двигателя под различными углами к ее оси.

Как и следовало ожидать, случайные блуждания узкого 10-миллиметрового пучка превышают амплитуду блужданий более широкого 30-миллиметрового пучка, а с уменьшением угла пересечения струи пучком растут. Данные демонстрируют также азимутальную асимметрию

угловых смещений пучка: в направлении  $OY$ , ортогональном к оси струи, дисперсия смещений превышает значения, полученные в ортогональном направлении  $OX$ . Особенно заметна указанная разница амплитуды блужданий для пучков, пересекающих струю поперек ( $\varphi = 90$  и  $45^\circ$ ). Здесь следует отметить, что данное наблюдение находится в согласии с результатами, полученными для углового спектра возмущенных струей лазерных пучков в этом же цикле экспериментов [2]. Результаты показали аналогичную асимметрию угловых распределений интенсивности, теоретически объясняемую в предположении анизотропии спектра неоднородностей в струе в области внешних масштабов турбулентности.

Наиболее интересным результатом из представленных в табл. 2 является обнаруженная сильная зависимость величины дисперсии случайных блужданий центроида пучка от длины волны излучения. Для интерпретации данного эффекта воспользуемся одним из основных результатов, полученных в [2] при анализе угловых спектров возмущенных пучков: пространственный спектр флуктуаций показателя преломления в струе двигателя должен включать в себя наряду с обычной спектральной функцией Кармана еще и дополнительную функцию, увеличивающую вклад высокочастотных компонент.

Таблица 1

Дисперсия блужданий центроида лазерного пучка ( $\sigma_x, \sigma_y$ , мкрад) и усредненная угловая полуширина по уровню  $1/e I_{\max}$  ( $\theta_x, \theta_y$ , мкрад) в горизонтальном и вертикальном направлениях

Эксперимент	Диаметр пучка, мм	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\theta_x$	$\theta_y$
$\lambda = 1,06$ мкм					
Двигатель выключен	30	11	11	26	26
	10	9	11	31	42
Двигатель включен	30	7	10	24	26
	10	7	8	29	39
$\lambda = 0,53$ мкм					
Двигатель выключен	30	10	23	22	22
	10	12	13	39	46
Двигатель включен	30	16	25	26	29
	10	11	12	36	39

Таблица 2

Среднеквадратические угловые смещения центроида лазерного пучка в горизонтальном и вертикальном направлениях:  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$ , мкрад

Параметры пучка		$\lambda = 1,06$ мкм		$\lambda = 0,53$ мкм	
		Диаметр, мм			
		30	10	30	10
$\varphi = 90^\circ$	$\sigma_x$	$50 \pm 5$	$85 \pm 10$	$115 \pm 5$	$175 \pm 20$
	$\sigma_y$	$80 \pm 10$	$130 \pm 15$	$135 \pm 5$	$195 \pm 20$
$\varphi = 45^\circ$	$\sigma_x$	$85 \pm 10$	$130 \pm 15$	$175 \pm 20$	$245 \pm 25$
	$\sigma_y$	$115 \pm 10$	$160 \pm 15$	$220 \pm 20$	$295 \pm 30$
$\varphi = 10^\circ$	$\sigma_x$	$130 \pm 15$	$175 \pm 20$	$245 \pm 25$	–
	$\sigma_y$	$145 \pm 15$	$190 \pm 20$	$275 \pm 30$	–

В [2] показано, что лазерный пучок с длиной волны  $\lambda = 1,06$  мкм почти «не чувствует» влияния этой высокочастотной компоненты спектра неоднородностей, в то время как для пучка с  $\lambda = 0,53$  мкм ее вклад в уширение углового распределения интенсивности является определяющим. Используя данные аргументы, проведем следующий анализ результатов.

Воспользуемся известным приближенным соотношением для дисперсии угловых наклонов прошедшей турбу-

лентную среду волны, наблюдаемых в фокальной плоскости объектива [3]:

$$\sigma^2 = \frac{1}{\pi k^2 a^2} \int_0^{2a} \left[ D''(\rho) + \frac{D'(\rho)}{\rho} \right] \times \left[ \arccos\left(\frac{\rho}{2a}\right) - \left(\frac{\rho}{2a}\right) \sqrt{1 - \frac{\rho^2}{4a^2}} \right] \rho d\rho, \quad (1)$$

где  $a$  – радиус объектива;  $D''$  и  $D'$  – вторая и первая производные от структурной функции фазы плоской волны;  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число.

Соотношение (1) может быть использовано для моделирования экспериментальных ситуаций, когда лазерный пучок пересекает струю поперек, поскольку в этом случае его поперечные размеры на входе и выходе струи заметно не отличаются. Как видно из табл. 1, дополнительные угловые отклонения пучка на атмосферной трассе за струей пренебрежимо малы, поэтому в фокальной плоскости приемного объектива при полном перехвате излучения анализируются блуждания пучка, обусловленные турбулентным слоем. В этих условиях соотношение (1), если в нем принять, что параметр  $a$  – радиус пучка, позволяет оценить дисперсию блужданий центра пучка.

В работе [2] было получено следующее аналитическое выражение для структурной функции фазы возмущенной турбулентным слоем волны, учитывающее анизотропию спектра неоднородностей среды в области внешних масштабов турбулентности:

$$D(x, y) = 2,92 k^2 L_t C_n^2 \left\{ (x^2 + y^2)^{5/6} - 0,2 \times \right. \\ \left. \times \left[ \frac{3 \left[ \left( \frac{L_{0x}}{L_{0y}} \right)^2 x^2 + \left( \frac{L_{0y}}{L_{0x}} \right)^2 y^2 \right] + x^2 + y^2}{(L_{0x} L_{0y})^{1/6}} \right] \right\}, \quad (2)$$

где параметры  $L_{0x}$  и  $L_{0y}$  характеризуют внешний масштаб турбулентности в направлении  $OX$  и  $OY$  соответственно.

Используя (1) и (2), нетрудно получить соотношения для компонент дисперсии блужданий центра пучка, учитывающие анизотропию турбулентного слоя:

$$\sigma_x^2(a) = 2,84 C_n^2 L_t (2a)^{-1/3} \times \\ \times \left\{ 1 - 0,1 \left( \frac{4a^2}{L_{0x} L_{0y}} \right)^{1/6} \left[ 3 \left( \frac{L_{0x}}{L_{0y}} \right)^2 + 1 \right] \right\}, \quad (3)$$

$$\sigma_y^2(a) = 2,84 C_n^2 L_t (2a)^{-1/3} \times \\ \times \left\{ 1 - 0,1 \left( \frac{4a^2}{L_{0x} L_{0y}} \right)^{1/6} \left[ 3 \left( \frac{L_{0y}}{L_{0x}} \right)^2 + 1 \right] \right\}. \quad (4)$$

В силу приближений, сделанных при выводе (2), эти соотношения справедливы лишь для узких пучков ( $a \ll L_{0x}$ ,  $L_{0y}$ ) и не слишком сильной анизотропии.

Структурная функция (2) отвечает анизотропному кармановскому спектру флуктуаций показателя преломления в приближении, учитывающем в первом порядке конечность внешнего масштаба турбулентности. Как указывалось выше, согласно [2] такой вид спектра вполне адекватно моделирует угловое распределение интенсивности возмущенного струей двигателя лазерного пучка с  $\lambda = 1,06$  мкм. Можно ожидать, что и блуждания «микронно-

го» пучка будут описываться соотношениями (3) и (4). В [2] также показано, что для моделирования наблюдаемого в эксперименте углового спектра лазерного излучения с длиной волны  $\lambda = 0,53$  мкм, возмущенного турбулентной струей, необходимо дополнить кармановский спектр неоднородностей функцией, увеличивающей вклад высокочастотных компонент.

Отмечено также, что угловое распределение «микронного» пучка практически «не чувствует» такой модификации спектра. Это связано и с особенностями проявления в угловом спектре излучения разных длин волн мелкомасштабных неоднородностей на трассе пучка, и с особенностями методики регистрации изображений пучка в эксперименте. Углы рассеяния света на неоднородностях пропорциональны длине волны излучения, поэтому в угловом распределении интенсивности «микронного» пучка высокочастотные компоненты спектра флуктуаций показателя преломления дают вклад лишь в далекие от ядра «крылья» распределения, а в угловом спектре «полумикронного» излучения эти же компоненты уширяют ядро распределения интенсивности.

Кроме того, при регистрации флуктуирующих изображений пучка выбором аттенуаторов ПЗС-камера настраивается таким образом, чтобы в пределах динамического диапазона (256 градаций) оказывались и наиболее яркие спеклы изображения. В результате яркость низкоинтенсивных «крыльев» снижается до уровня фоновых засветок и собственных шумов камеры, вычитаемых при обработке результатов, и, следовательно, в случае излучения с  $\lambda = 1,06$  мкм «крылья» распределения практически не регистрируются. В связи с этим высокочастотная часть спектра должна давать и для блужданий пучков заметный вклад лишь в случае излучения  $\lambda = 0,53$  мкм.

В работе [2] соответствие экспериментальных и теоретически рассчитанных угловых спектров излучения различных длин волн было достигнуто с помощью как многомасштабной высокочастотной спектральной функции, так и функции одномасштабного типа. Запишем соответствующие структурные функции фазы для обоих указанных вариантов:

$$D_1(r) = 2,77 k^2 C_n^2 L_t \times \\ \times \left[ \frac{\pi L_{0s}^{5/3}}{\Gamma(1/6)} - (r L_{0s} / 2)^{5/6} K_{-5/6}(r/L_s) \right], \quad (5)$$

$$D_2(r) = 2 \sqrt{\pi} k^2 \langle n_1^2 \rangle L_t L_{0s} \{ 1 - \exp[-(r/L_s)^2] \}, \quad (6)$$

где  $L_s$  – внешний масштаб неоднородностей для многомасштабного спектра или характерный размер неоднородностей для одномасштабного спектра;  $n_1$  – амплитуда неоднородностей показателя преломления.

Из соотношения (2) с помощью (5) или (6) нетрудно вычислить соответствующие дисперсии блужданий пучка  $\sigma_1^2$  и  $\sigma_2^2$ , обусловленные вкладом дополнительной высокочастотной спектральной функции того или иного вида. Поскольку при выводе соотношения (2) использовалось статистическое усреднение, чтобы вычислить при известных  $\sigma^2$  и  $\sigma_1^2$  (или  $\sigma_2^2$ ) дисперсию блужданий пучка  $\sigma_i^2$  под действием всего спектра неоднородностей в струе, необходимо выяснить, насколько коррелируют угловые смещения, обусловленные основной (спектр Кармана) и дополнительной высокочастотной компонентами спектра неод-

нородностей. Примененная нами методика эксперимента легко позволяет определить корреляцию угловых смещений для пучков с  $\lambda = 1,06$  и  $0,53$  мкм по их измерению в

каждом импульсе лазера. В табл. 3 приведены вычисленные по экспериментальным данным коэффициенты корреляции компонент вектора угловых смещений пучков  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$ .

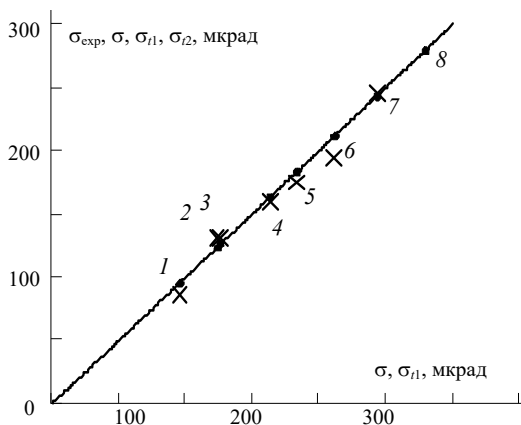
Таблица 3

Коэффициенты корреляции компонент вектора угловых смещений центров лазерных пучков с длинами волн (1 = 1,06 мкм и 2 = 0,53 мкм)

Коэффициент корреляции	Угол пересечения струи $\varphi$ , град					
	90		45		10	
	Диаметр, мм					
	30	10	30	10	30	10
$K_{\sigma_x}(\lambda_1, \lambda_2)$	1	0,96	0,93	1	1	1
$K_{\sigma_y}(\lambda_1, \lambda_2)$	1	0,85	0,97	1	0,96	1
$K_{\lambda_1}(\sigma_x, \sigma_y)$	-0,2	-0,01	-0,03	0,05	-0,06	-0,09
$K_{\lambda_2}(\sigma_x, \sigma_y)$	-0,23	0,003	-0,05	0,001	0,09	0,16

Видно, что для пучков разных длин волн корреляция угловых смещений центра  $K_{\sigma}(\lambda_1, \lambda_2)$  близка к 100%. Для сравнения приведены также вычисленные коэффициенты взаимной корреляции ортогональных компонент вектора угловых смещений пучка  $K_{\lambda}(\sigma_x, \sigma_y)$ , практически показавшие отсутствие их корреляции. Поскольку зарегистрированные блуждания «микронного» пучка обусловлены только спектром Кармана, а «полумикронного» – обеими компонентами, то так же коррелируют и вклады в угловые смещения пучка от каждой из компонент спектра неоднородностей. Следовательно, вектор среднеквадратических угловых смещений «полумикронного» пучка должен определяться из соотношения:  $\sigma_t = \sigma + \sigma_{1(2)}$ .

Степень соответствия экспериментально измеренных компонент вектора среднеквадратических угловых смещений узкого лазерного пучка (диаметр 10 мм) и вычисленных из полученных нами соотношений для анализируемых экспериментальных ситуаций:  $\varphi = 90$  и  $45^\circ$ , показана на рисунке.



Расчетные и экспериментальные значения компонент  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  вектора среднеквадратических угловых смещений центра возмущенного пучка:  $\times$  – экспериментальные значения  $\sigma_{exp}$ ;  $\bullet$  – расчетные значения  $\sigma$  (1–4) и  $\sigma_{t1}$  (5–8);  $\square$  – расчетные значения  $\sigma_{t2}$  (5–8); 1 и 2 – x- и y-компоненты ( $\lambda = 1,06$  мкм и  $\varphi = 90^\circ$ ); 3 и 4 – x- и y-компоненты ( $\lambda = 1,06$  мкм и  $\varphi = 45^\circ$ ); 5 и 6 – x- и y-компоненты ( $\lambda = 0,53$  мкм и  $\varphi = 90^\circ$ ); 7 и 8 – x- и y-компоненты ( $\lambda = 0,53$  мкм и  $\varphi = 45^\circ$ )

По оси абсцисс отложены значения расчетной величины угловых смещений с использованием спектра Кармана для ( $\lambda = 1,06$  мкм) (□) и комбинации ее с многомас-

штабной высокочастотной спектральной функцией для  $\lambda = 0,53$  мкм ( $\sigma_{t1} = \sigma + \sigma_{t1}$ ). Ось ординат дает экспериментальные значения  $\sigma_{exp}$ , расчетные  $\sigma_{t1} = \sigma + \sigma_{t1}$  и  $\sigma_{t2} = \sigma + \sigma_{t2}$  для  $\lambda = 0,53$  мкм с использованием комбинации спектра Кармана и одномасштабной высокочастотной компоненты. При расчете использовались значения параметров турбулентного слоя  $C_n^2 = 1,5 \cdot 10^{-9} \text{ м}^{-2/3}$ ,  $L_y = 0,7$  м,  $C_n^2 = 1,2 \cdot 10^{-8}$ ,  $\langle n_1^2 \rangle = 2 \cdot 10^{-11}$  и  $L_s = 1$  мм, которые были определены в работе [2] путем сопоставления расчетного и экспериментально полученного углового спектра возмущенных пучков. Значение  $L_{0x} = 0,32$  м, выбранное при расчете блужданий из условия сходства с экспериментом, немного отличается от подобранного в [2] значения  $L_{0x} = 0,35$  м.

Из рисунка видно, что вычисленные значения  $\sigma_{t1}$  хорошо согласуются с экспериментальными результатами, а значения  $\sigma_{t2}$  сильно занижены. Иначе говоря, амплитуда блужданий «полумикронного» пучка сильно зависит от вида высокочастотной компоненты спектра и, следовательно, анализ блужданий пучка позволяет конкретизировать ее вид. Это очень важно, поскольку в работе [2] показано, что угловой спектр возмущенных струй лазерных пучков практически не зависит от вида высокочастотной спектральной функции.

Таким образом, нами экспериментально определены и исследованы случайные блуждания лазерных пучков, пересекающих струю авиационного двигателя под различными углами к ее оси:  $\varphi = 90, 45$  и  $10^\circ$ . Случайные блуждания пучка диаметром 10 мм превышают амплитуду блужданий 30-мм пучка для  $\lambda = 1,06$  и  $0,53$  мкм и растут с уменьшением угла пересечения струи пучком. Обнаружена сильная зависимость амплитуды блужданий пучка от длины волны излучения. Среднеквадратические угловые смещения центра пучка с длиной волны  $\lambda = 0,53$  мкм примерно в 2 раза превышают смещения пучка с  $\lambda = 1,06$  мкм в одних условиях эксперимента. Отмечено также наличие азимутальной асимметрии угловых смещений пучка: в направлении  $OY$ , ортогональном к оси струи, дисперсия смещений превышает значения, полученные в ортогональном направлении  $OX$ .

Примененная методика одновременной регистрации изображений пучков с различными длинами волн в каждом импульсе позволила определить коэффициенты взаимной корреляции компонент вектора угловых смещений пучков с  $\lambda = 0,53$  и  $1,06$  мкм. Показано, что для пучков разных длин волн корреляция одноименных компонент вектора угловых смещений центра пучка близка к 100%. В то же время корреляция ортогональных ком-

попент вектора угловых смещений для пучка одной длины волны практически отсутствует.

Получены соотношения для дисперсии случайных угловых смещений узкого лазерного пучка, прошедшего тонкий анизотропный турбулентный слой, характеризуемый спектром Кармана для флуктуаций показателя преломления. Анализ показал, что для объяснения спектральной зависимости блужданий пучка, возмущенного струей, необходимо дополнить спектр Кармана дополнительной высокочастотной спектральной функцией и учесть особенности регистрации сильно флуктуирующих изображений пучка. С учетом определенного по данным эксперимента коэффициента корреляции угловых смещений пучков различной длины волны полученные соотношения позволяют моделировать экспериментальные результаты для узкого пучка.

Из расчетов следует, что амплитуда угловых смещений пучка с длиной волны  $\lambda = 0,53$  мкм сильно зависит от вида дополнительной высокочастотной компоненты спектра флуктуаций показателя преломления – экспериментальные

данные отвечают значениям, рассчитанным на основе функции многомасштабного типа, а использование одномасштабной функции дает резко заниженные значения угловых смещений пучка.

Таким образом, анализ блужданий пучков, возмущенных струей авиадвигателя, в отличие от анализа их усредненных угловых распределений интенсивности [2], позволяет конкретизировать вид пространственного спектра неоднородностей в струе, что необходимо для адекватного моделирования процесса распространения излучения.

1. Гурвич А.С., Кон А.И., Миронов В.Л., Хмелевцов С.С. Лазерное излучение в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1976. 277 с.
2. Сиразетдинов В.С., Дмитриев Д.И., Иванова И.В., Титтертон Д.Г. Воздействие струи турбореактивного авиационного двигателя на лазерное излучение. Ч. 1. Угловой спектр возмущенного пучка // Оптика атмосф. и океана. 2001. Т. 14. № 10. С. 900–905.
3. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967. 548 с.

*V.S. Sirazetdinov, D.I. Dmitriev, I.V. Ivanova, D.H. Titterton. Effect of a turbo-engine jet on laser radiation. Part 2. Random wanderings of a perturbed beam.*

Experimental measurements of dispersion of a laser beam centroid wanderings for beams intersecting a turbo-engine jet at different angles ( $\varphi = 90, 45, 10^\circ$ ) have been carried out. The obtained values are within  $\sim 60 \div 180$  mrad for  $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$  and  $110 \div 300$  mrad for  $\lambda = 0.53 \mu\text{m}$ . A certain difference in dispersion of beam wanderings in horizontal and vertical (orthogonally to jet's axis) directions has been detected. The analytical model for calculating dispersion of laser beam's wanderings agreeable with experimental data is presented. The results of the experiment have allowed us to estimate the type of a high-frequency component of refraction index fluctuations spectrum in the jet, which supplements Karman's spectrum for a turbulent medium.