

А.Л. Афанасьев, Г.Я. Патрушев, А.П. Ростов**ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МОДЕЛИ СПЕКТРАЛЬНОГО ТЕНЗОРА ПОЛЯ СКОРОСТИ ВЕТРА В ПРИЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЕ**

С целью описания пространственной структуры турбулентности в области больших пространственных масштабов сделана попытка использования модельного подхода, сущность которого заключается в определении спектрального тензора на основе измерения, либо модельного задания одномерных пространственных спектров флуктуаций трех компонент скорости ветра. Полученный таким путем спектральный тензор используется для предсказания пространственной когерентности флуктуаций компонент скорости в плоскости, перпендикулярной направлению среднего ветра. Проведено сравнение предсказанной когерентности и экспериментально найденной. На основе полученных данных анализируются применимость и ограничения данной модели спектрального тензора анизотропного поля скорости для однородной турбулентности приземного слоя атмосферы.

В последнее время математическое и физическое моделирование пограничного слоя атмосферы получило бурное разностороннее развитие, однако, несмотря на определенные успехи, единой универсальной модели пограничного слоя атмосферы пока нет. В то же время разработано большое число частных моделей [1], каждая из которых удовлетворительно воспроизводит те или иные свойства пограничного слоя.

Выбор модели определяется спецификой решаемой прикладной задачи. В частности, существуют важные практические проблемы, требующие понимания пространственной структуры поля скорости ветра в пограничном слое атмосферы. Например, расчеты воздействия ветровых нагрузок ставят вопрос о корреляциях ветровых пульсаций на разных уровнях в пределах пограничного слоя, когда спектральная когерентность используется для оценки пространственной изменчивости давления ветра на конструкции.

Описанные в литературе многочисленные наблюдения одномерной компоненты спектра скорости в пограничном слое атмосферы являются не достаточными для описания пространственной структуры турбулентности, когда расстояния между точками наблюдения становятся соизмеримыми с масштабом турбулентности.

Для исследования турбулентности в области больших пространственных масштабов в [2] предложена кинематическая модель турбулентности, основанная на представлении пространственного спектра флуктуаций скорости ветра в виде анизотропного тензора  $\Phi_{ij}(\mathbf{k})$ .

Спектр  $\Phi_{ij}(\mathbf{k})$  является обобщением однородного и изотропного пространственного спектра  $\Phi(\mathbf{k})$  на случай однородного, но анизотропного поля скорости в пограничном слое.

Рассмотрим однородное несжимаемое турбулентное поле скорости. Для такого поля среднее по ансамблю значение скорости ветра  $V_0$  неизменно в пространстве, а ковариационный тензор

$$B_{ij}(\mathbf{r}) = \langle [V_i(\mathbf{r}_1) - V_{0i}] [V_j(\mathbf{r}_2) - V_{0j}] \rangle, \quad i, j = 1, 2, 3, \quad (1)$$

является функцией только вектора разнosa  $\mathbf{r} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1$ .

Введем пространственную систему координат так, что продольное направление (вдоль среднего ветра) будем характеризовать единичным вектором  $\mathbf{i}_1$ , вертикальное направление – единичным вектором  $\mathbf{i}_3$ , а поперечное направление, соответственно, вектором  $\mathbf{i}_2 = \mathbf{i}_3 \times \mathbf{i}_1$ .

В работе [2] для спектрального тензора  $\Phi_{ij}(\mathbf{k}) = \frac{1}{(2\pi)^3} \int B_{ij}(\mathbf{r}) \exp(-i\mathbf{k}\mathbf{r}) d^3r$  предложен следующий вид:

$$\Phi_{ij}(\mathbf{k}) = \sum_{l=1}^3 A_l(\mathbf{k}) \left\{ \delta_{ij} - \frac{\mathbf{k}_l \mathbf{k}_l}{k^2} \right\} \left\{ \delta_{ij} - \frac{\mathbf{k}_l \mathbf{k}_l}{k^2} \right\}, \quad (2)$$

где  $A_1(\mathbf{k}), A_2(\mathbf{k}), A_3(\mathbf{k})$  – вещественные независимые скалярные функции от  $\mathbf{k}$ . Полагая в (2) все три  $A$ -функции одинаковыми  $A_1(\mathbf{k}) = A_2(\mathbf{k}) = A_3(\mathbf{k}) = E(\mathbf{k})/(4 \pi k^2)$  и суммируя по  $l$ , получим хорошо известное [3] выражение для изотропного спектрального тензора

$$\Phi_{ij}(\mathbf{k}) = \frac{E(\mathbf{k})}{4 \pi k^2} \left\{ \delta_{ij} - \frac{\mathbf{k}_i \mathbf{k}_j}{k^2} \right\}.$$

Другими словами, изотропность включается в модель как частный случай.

Будем исследовать поле скорости в плоскости, перпендикулярной направлению среднего ветра  $V_0 \mathbf{i}_1$ , т.е. определим смещение в виде

$$\mathbf{R} = R \cos \theta \mathbf{i}_2 + R \sin \theta \mathbf{i}_3, \quad (3)$$

где  $\theta$  – угол между направлением смещения и горизонтом.

Одним из важнейших применений спектрального тензора является изучение пространственной структуры турбулентности. Полезным инструментом для этих целей является функция когерентности

$$W_{ij}^2(\mathbf{R}, \omega) = |W_{ij}(\mathbf{R}, \omega)|^2 / [W_{ij}(0, \omega) W_{ij}(0, \omega)], \quad (4)$$

где  $W_{ij}(\mathbf{R}, \omega) = \frac{1}{2 \pi} \int_{-\infty}^{\infty} B_{ij}(\mathbf{R}, \tau) \exp(-i \omega \tau) d \tau$  – взаимный спектр.

Преобразуя в соответствии с гипотезой «замороженности» Тейлора пространственно-временную корреляционную функцию  $B_{ij}(\mathbf{R}, \tau)$  в чисто пространственную, разлагая ее в трехмерный пространственный спектр и интегрируя по  $\tau$ , для взаимного спектра получим

$$W_{ij}(\mathbf{R}, \omega) = \frac{1}{V_0} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_{ij} \left( -\frac{\omega}{V_0} \mathbf{i}_1 + \kappa_2 \mathbf{i}_2 + \kappa_3 \mathbf{i}_3 \right) \exp[i R (\kappa_2 \cos \theta + \kappa_3 \sin \theta)] d \kappa_2 d \kappa_3, \quad (5)$$

где  $\Phi_{ij}(\mathbf{k})$  определяется выражением (2).

Рассмотрим, для определенности, спектр когерентности для продольных компонент скорости ( $i = j = 1$ ) при разнесении точек наблюдения в плоскости, перпендикулярной направлению среднего ветра.

Переходя в (5) к полярным координатам, после интегрирования по угловой переменной получим

$$W_{11}(\mathbf{R}, \omega) = \frac{2 \pi}{V_0} \int_0^{\infty} \frac{k^3}{k^4} d k \left\{ A_1(k) k^2 J_0(R k) + A_2(k) \left( \frac{\omega}{V_0} \right)^2 \left[ J_0(R k) \cos^2 \theta - \frac{J_1(R k)}{R k} \cos(2 \theta) \right] + A_3(k) \left( \frac{\omega}{V_0} \right)^2 \times \right. \\ \left. \times \left[ J_0(R k) \sin^2 \theta + \frac{J_1(R k)}{R k} \cos(2 \theta) \right] \right\}, \quad (6)$$

где  $k = \sqrt{\kappa^2 + \frac{\omega^2}{V_0^2}}$ ;  $J_n(x)$  – функции Бесселя  $n$ -го порядка.

Таким образом, задача состоит в том, чтобы определить неизвестные функции  $A(\mathbf{k})$ . Кристенсен и Ленсхоу в [2] разработали модель спектрального тензора  $\Phi_{ij}(\mathbf{k})$ , согласно которой функции  $A_1(\mathbf{k}), A_2(\mathbf{k}), A_3(\mathbf{k})$  выражаются через одномерные пространственные спектры флук-

туаций компонент скорости ветра  $F_{ii}(\mathbf{k}, \mathbf{i}_1) = \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_{ii}(\mathbf{k}) d \kappa_2 d \kappa_3$ . Сущность такого подхода заклю-

чается в определении спектрального тензора путем измерения либо модельного задания одномерных пространственных спектров  $F_u(\kappa)$ ,  $F_v(\kappa)$ ,  $F_w(\kappa)$  флуктуаций соответственно продольной  $u$ , поперечной  $v$  и вертикальной  $w$  компонент скорости ветра. Одномерные модельные спектры обладают тем свойством, что они приближаются к локально изотропным при больших волновых числах, но могут иметь различные масштабы и кривизну при малых волновых числах в энергетической области спектра.

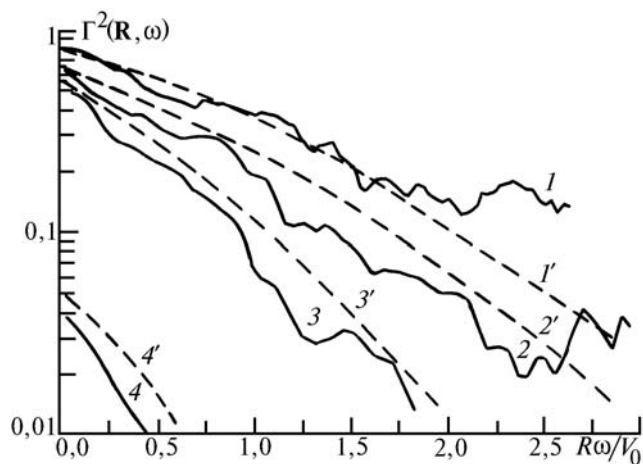
Таким образом, следуя модели [2], мы можем вычислить три  $A$ -функции, определяющие спектральный тензор и, следовательно, предсказать когерентность.

С целью проверки данной модели была проведена серия экспериментальных работ. С помощью трех акустических метеостанций [4] проводились одновременные измерения продольной  $u$ , поперечной  $v$  и вертикальной  $w$  компонент скорости ветра при разнесении метеостанций как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости.

В процессе обработки данных измерений вычислялись авто- и взаимные корреляционные функции, автоспектры, фазовые спектры и спектры когерентности для всех трех компонент скорости. Окончательный анализ данных к настоящему времени не завершен. Однако в качестве предварительных результатов можно провести сравнение спектров когерентности флуктуаций продольной компоненты скорости ветра для поперечных горизонтальных разносов (что соответствует углу  $\theta = 0$ ).

На рисунке штриховыми линиями изображены спектры когерентности, предсказанные для различных разносов на основании модельного представления [2] и относящиеся к нейтральному пограничному слою (кривые  $1' - 4'$ ), а сплошными линиями – когерентности, непосредственно найденные в эксперименте ( $1 - 4$ ).

В соответствии с полученными данными когерентность для разносов, малых по сравнению с внешним масштабом турбулентности  $L$ , является хорошо предсказуемой. Причем лучшее совпадение наблюдается в области малых волновых чисел. Для больших расстояний предсказанная когерентность несколько превышает экспериментально найденную. Данное несоответствие, по видимому, объясняется ограничениями, заложенными в модель вследствие использования гипотезы «замороженности» при переходе от частотных спектров к пространственным, а также тем, что модельное описание распространяется только на однородную турбулентность.



Экспериментально найденные (кривые  $1 - 4$ ) и рассчитанные по модели (кривые  $1' - 4'$ ) спектры когерентности для продольных компонент скорости ветра при различных разносах в поперечном горизонтальном направлении:  $1, 1' - R/L = 0,064$ ;  $2, 2' - 0,127$ ;  $3, 3' - 0,509$ ;  $4, 4' - 1,018$

Следующим шагом может быть модернизация модели с учетом «локальной замороженности», а также ее расширение на случай неоднородного поля скорости ветра в пограничном слое атмосферы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. (Грант N 94-05-16601).

1. Бызова Н.Л., Иванов В.Н., Гаргер Е.К. Турбулентность в пограничном слое атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 263 с.
2. Kristensen L., Lenschow D.H., Kirkegaard P., Courtney M. // *Boundary-Layer Meteorology*. 1989. V. 47. P. 149–193.
3. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967. 548 с.
4. Ростов А.П. // *Оптика атмосферы и океана*. 1993. Т. 6. N 1. С. 102–106.

Институт оптики атмосферы СО РАН,  
г. Томск

Поступила в редакцию  
23 декабря 1994 г.

A. L. Afanasyev, **G. Ja. Patrushev**, A. P. Rostov. **First Results of Experimental Investigation of Model of the Wind Velocity Field Spectral Tensor in the Near-ground Atmosphere.**

Attempts to use a model approach were made to describe spatial structure of turbulence on large spatial scale. The principle of the approach is the determination of the spectral tensor based on measurements or model setting of one-dimensional spectra of the wind velocity three components fluctuation. The spectral tensor obtained in such a manner is used to predict spatial coherence of the velocity components fluctuating in the plane perpendicular to the central wind direction. The comparison between the predicted and founded experimentally coherences is performed. The usability and limitations of the given model of spectral tensor of the velocity anisotropic field in homogeneous turbulence of near-ground atmospheric layer is analysed based on the data obtained.