УДК 551.511.61

Н.Н. Безуглова, Ю.А. Суковатов,
К.Ю. Суковатов, И.А. Суторихин

Об улучшенной модели горизонтально-неоднородного пограничного слоя атмосферы

Уравнения пограничного слоя атмосферы (ПСА) обычно решаются вместе с эмпирическими пристенными функциями, которые позволяют избежать численных расчетов в области больших градиентов вблизи подстилающей поверхности. В случае горизонтальной неоднородности свойств подстилающей поверхности, трехмерных потоков, нестационарных потоков и поверхностей, где происходит тепло- и влагообмен, пристенные функции неприменимы [1]. Зарубежными авторами предложено несколько способов замыкания системы уравнений турбулентного ПСА, не использующих пристенные функции [1]. Наиболее широко используется модель Лаундера и Шармы для двумерного потока [1], однако эта модель содержит добавочные члены в уравнениях для кинетической энергии турбулентности b и скорости диссипации энергии турбулентности ε. Большую проблему представляет использование этих добавочных членов в случае более общей трехмерной модели.

В настоящей работе проводится анализ другого способа замыкания системы уравнений турбулентности, предложенного Ламой и Брэмхорстом [2]. Эта модель сформулирована для трехмерного случая и не содержит добавочных членов в уравнениях для кинетической энергии турбулентности и скорости диссипации энергии турбулентности. Модель Ламы и Брэмхорста предназначена для расчетов вблизи стенки. Можно использовать эту модель для расчетов структуры горизонтально-неоднородного пограничного слоя атмосферы, если учесть силу Кориолиса и силы плавучести. Кроме того, необходимо добавить уравнения для переноса тепла, влаги и пассивной примеси. Полученная модель применима на любых расстояниях от подстилающей поверхности. Описанная модель горизонтально-неоднородного ПСА имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial z}\left[\left(\nu+\frac{k}{\delta_u}\right)\frac{\partial u}{\partial z}\right]-w\frac{\partial u}{\partial z}-u\frac{\partial u}{\partial x}+f v=0\,, \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial z}\left[\left(\nu+\frac{k}{\delta_v}\right)\frac{\partial v}{\partial z}\right]-w\frac{\partial v}{\partial z}-u\frac{\partial v}{\partial x}-f\left(u-G\right)=0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial w}{\partial z}=0\,, \tag{3}$$

$$\frac{\partial}{\partial z}\left[\left(\nu+\frac{k}{\delta_b}\right)\frac{\partial b}{\partial z}\right]-w\frac{\partial b}{\partial z}-u\frac{\partial b}{\partial x}+ +k\left[\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2+\left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2-\beta\frac{\partial \theta}{\partial z}-\beta_1\frac{\partial q}{\partial z}\right]-\varepsilon=0\,, \tag{4}$$

$$\frac{\partial}{\partial z}\left[\left(\nu+\frac{k}{\delta_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial z}\right]-w\frac{\partial \varepsilon}{\partial z}-u\frac{\partial \varepsilon}{\partial x}+ +c_{\varepsilon 1}f_1\frac{\varepsilon}{b}k\left[\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2+\left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2\right]- \alpha_\theta\frac{g}{\theta}\frac{d\theta}{dz}\frac{\varepsilon}{b}-c_{\varepsilon 2}f_2\frac{\varepsilon^2}{b}=0\,, \tag{5}$$

$$\frac{\partial}{\partial z}\left[\left(\nu+\frac{k}{\delta}\right)\frac{\partial \theta}{\partial z}\right]-w\frac{\partial \theta}{\partial z}-u\frac{\partial \theta}{\partial x}=0 \tag{6}$$

$$\frac{\partial}{\partial z}\left[\left(\nu+\frac{k}{\delta}\right)\frac{\partial q}{\partial z}\right]-w\frac{\partial q}{\partial z}-u\frac{\partial q}{\partial x}=0 \tag{7}$$

$$\frac{\partial}{\partial z}\left[\left(\nu+\frac{k}{\delta}\right)\frac{\partial e}{\partial z}\right]-w\frac{\partial e}{\partial z}-u\frac{\partial e}{\partial x}=0 \tag{8}$$

$$k=c_\mu\, f_\mu\, b_2/\varepsilon\,, \tag{9}$$

$$R_T=b^2/\nu\varepsilon\,, \tag{10}$$

$$R_z=(\sqrt{b}\,)z/\nu\,, \tag{11}$$

$$f_\mu=\left[1-\exp\left(-0{,}0165R_z\right)\right]^2\left(1+\frac{20{,}5}{R_T}\right), \tag{12}$$

$$f_1=1+\left(\frac{0{,}05}{f_\mu}\right)^3, \tag{13}$$

$$f_2=1-\exp\left(-R_T^2\right). \tag{14}$$

c_μ, $c_{\varepsilon 1,}$ $c_{\varepsilon 2,}$ δ, δ_ε − эмпирические константы, n − молекулярная кинематическая вязкость, b −кинетическая энергия турбулентности, e − скорость диссипации турбулентной энергии в тепло, k − коэффициент турбулентного обмена, u, ν, w − компоненты скорости, θ − потенциальная температура, q − влажность,

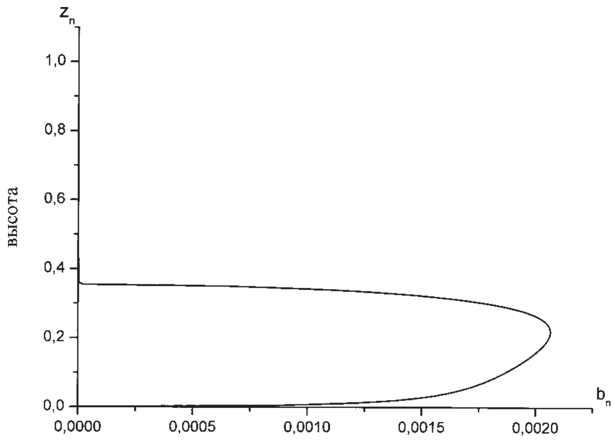

Рис. 1. Вертикальный профиль кинетической энергии турбулентности (b_n)

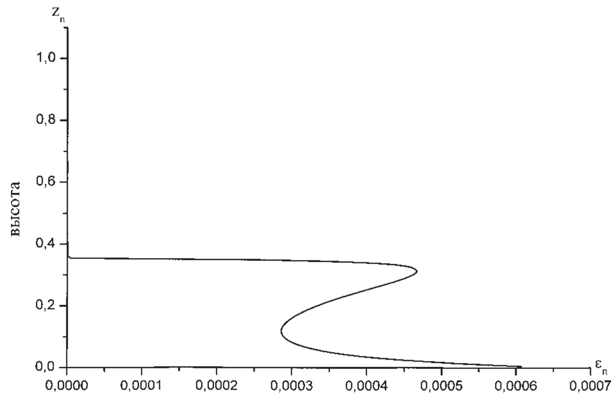

Рис. 2. Вертикальный профиль скорости диссипации энергии турбулентности

e – концентрация примеси, x, z – горизонтальная и вертикальная координаты, G – скорость геострофического ветра.

Граничные условия:

$$z = z_1 \quad u = w = 0, \quad b = 0, \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = 0$$

$$z = 1 \quad u = G, \quad b = 0, \quad \varepsilon = 0 .$$

Нами были проведены расчеты по упрощенной модели (1–10) с целью сравнения полученных результатов с данными по распределению кинетической энергии турбулентности и скорости диссипации энергии турбулентности вблизи стенки, приведенными в [1]. На рисунке 1 представлено вертикальное распределение энергии турбулентности b в ПСА. При расчетах использовались нормированные величины. Энергия турбулентности b нормирована на G^2, вертикальная координата на высоту пограничного слоя h. Наблюдается хорошее соответствие рассчитанного профиля с экспериментальными данными по распределению энергии турбулентности, приведенными в [1]. На рисунке 2 приведено рассчитанное распределение по высоте скорости диссипации энергии турбулентности ε. Скорость диссипации энергии турбулентности нормирована на G^3/h. Рассчитанный профиль скорости диссипации энергии турбулентности также хорошо согласуется с экспериментальными данными, приведенными в [1]. Это соответствие показывает, что можно применять полную описанную выше модель турбулентности (1–14) для расчетов параметров горизонтально-неоднородного ПСА, что и предполагается сделать в дальнейшем.

Литература

1. V. C. Patel, W. Rodi, G. Scheuerer. Turbulence Models for Near-Wall and Low Reynolds Number Flows: A Review. AIAA J., 1985. T. 23, N9. P. 1308–1319.

2. C.K.G. Lam, K. Bremhorst. F Modelling Form of the Model for Predicting Wall Turbulence,Journal of Fluids Engineering, September, 1981. Vol. 103. P. 456–460.